

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ESTUDIO CUANTITATIVO DE LA CALIDAD SONORA DE UNA GUITARRA ESPAÑOLA



Autor: Denis Bustins Molina
Director: Eva Martinez Gonzalez
Co-Director: Robert Arcos Villamarín
Convocatoria: Junio 2017

RESUM	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
AGRADECIMIENTOS	7
PREFACIO	8
ORIGEN DEL TRABAJO	8
MOTIVACIÓN	8
REQUERIMIENTOS PREVIOS	8
INTRODUCCIÓN	9
OBJETIVOS DEL TRABAJO	9
ALCANCE DEL TRABAJO	9
INTRODUCCIÓN HISTÓRICA	10
CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA	19
PROPAGACIÓN DEL SONIDO	19
TONO	25
INTENSIDAD	28
TIMBRE	31
DURACIÓN	36
FENÓMENOS ACÚSTICOS	37
RADIACIÓN DEL SONIDO	37
ABSORCIÓN	40
REFLEXIÓN	42
REFRACCIÓN	44
DIFRACCIÓN	45
IMPORTANCIA DE LOS FENÓMENOS ACÚSTICOS EN LA GUITARRA	47

PARTES CONSTITUTIVAS DE LA GUITARRA	53
CAJA DE RESONANCIA	54
PUENTE	54
TAPA ARMÓNICA	57
FLANCOS	61
FONDO	62
MÁSTIL	63
DIAPASÓN	66
CABEZA	71
CUERDAS	72
ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOMENTOS	75
CÁLCULO DE FUERZAS	76
DIAGRAMA DE SÓLIDO LIBRE	78
DIAGRAMAS DE ESFUERZOS Y MOMENTOS	81
CALIDAD DEL SONIDO	84
REPRESENTACIÓN DEL DOMINIO TEMPORAL	86
REPRESENTACIÓN DEL DOMINIO FRECUENCIAL	90
RATIOS SUBJETIVOS	93
ENSAYOS EXPERIMENTALES	95
OBJETIVO	95
INSTRUMENTACIÓN	96
METODOLOGÍA	98
MONTAJE Y PREPARACIÓN	102
MEDIDAS	107
ENSAYO PARA DETERMINAR LA POTENCIA E INTENSIDAD ACÚSTICA	107
ENSAYO PARA DETERMINAR LA CALIDAD SONORA	112
INTERPRETACIÓN Y PROCESADO DE RESULTADOS	114
ENSAYO PARA DETERMINAR LA POTENCIA E INTENSIDAD ACÚSTICA	114
ENSAYO PARA DETERMINAR LA CALIDAD SONORA	123
CONCLUSIONES	159
BIBLIOGRAFÍA	162

RESUM

Aquest projecte, té com a objectiu principal fer un estudi, mitjançant assaigs experimentals, de la qualitat sonora d'una guitarra espanyola. El projecte consta de dues parts, una descriptiva i l'altra experimental. En la primera part explicarem l'objecte d'estudi, que és la guitarra. Parlarem de les seves parts constitutives, de com afecta cada una de les parts en la qualitat sonora, farem una breu explicació de l'evolució històrica de la guitarra i estudiarem el seu comportament dinàmic. També donarem quatre pinzellades sobre acústica, explicant com es comporta el so, quines propietats el caracteritza, quins fenòmens físics intervenen i la aplicació directa d'aquests coneixements a la guitarra. La segona part consisteix en aplicar part d'aquests coneixements a assaigs experimentals, i comprovar si els resultats obtinguts coincideixen amb la teoria explicada al primer apartat. En aquests assaigs compararem tres guitarres de nivells de qualitat diferents, estimulant-les manualment i gravant el so en una cambra semianecoica mitjançant deu micròfons. Una vegada captada la senyal, la processarem mitjançant el programa Matlab i farem un post-processat manual per obtenir els resultats que desitgem estudiar i comparar. Una vegada obtinguts els resultats, farem una comparació entre guitarres i analitzarem si els resultats adquirits coincideixen amb els diferents nivells de qualitat de cada guitarra.

RESUMEN

Este proyecto, tiene como objetivo principal hacer un estudio, mediante ensayos experimentales, de la calidad sonora de una guitarra española. El proyecto consta de dos partes, una descriptiva y otra experimental. En la primera parte explicaremos el objeto de estudio, que es la guitarra. Hablaremos de sus partes constitutivas, cómo afecta cada parte de la guitarra en la calidad sonora, haremos una breve explicación de su evolución histórica y estudiaremos su comportamiento dinámico. También daremos cuatro pinceladas sobre acústica, explicando cómo se comporta el sonido, qué propiedades lo caracteriza, qué fenómenos físicos intervienen en él y la aplicación directa de estos conocimientos a la guitarra. La segunda parte consiste en aplicar parte de esos conocimientos a ensayos experimentales, y comprobar si los resultados obtenidos coinciden con la teoría explicada en el primer apartado. En estos ensayos compararemos tres guitarras de tres niveles de calidad distintas, estimulándolas manualmente y grabando su sonido en una cámara semianecoica mediante diez micrófonos. Una vez captada la señal, la procesaremos mediante el programa Matlab y haremos un post-procesado manual para obtener los resultados que deseamos estudiar y comparar. Una vez obtenidos los resultados, haremos una comparación entre guitarras y analizaremos si los resultados logrados coinciden con los distintos niveles de calidad de cada guitarra.

ABSTRACT

The aim of this project is study the sound quality of the Spanish guitar by doing some tests. The research has two different parts; the first one is a description of the task and the second one is practical oriented, where I explain the tests I developed.

In the first place I will explain the main object of this study, which is the guitar. More specifically its parts and how they affect to the sound quality. Furthermore, I will talk about the dynamic behavior of the guitar and there is a brief explanation about the historic context and its evolution. Finally, you will find some information about acoustics and how the sound behaves, which characteristics define the sound and which elements take part of it. All of these will be related to the guitar framework.

During the second part of the project I tried to use all the theoretical knowledge previously studied to run the tests and finally get the chance to know if the practical conclusions meet the theory.

On the practical part I compered three different guitars from three different quality levels, by playing them and recording the sound on a semi-anechoic chamber with ten microphones. Once the signal has been recognized, the program Matlab can process the information and a post manual control can be made in order to obtain the final result, ready to be studied. Afterwards, I will be able to compare the acquired facts of each guitar with its quality levels and finally conclude it they are related.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Robert Arcos, co-director del proyecto, por su implicación y apoyo, y al departamento de acústica de la Universidad Politécnica de Catalunya, en el campus Terrassa, (LEAM) por toda su atención y por darme toda la libertad para usar sus equipos e instalaciones, de valor inestimable.

PREFACIO

Origen del trabajo

La elección del tema del TFG no ha sido una decisión fácil, ya que tenía varias opciones en mente, pero el hecho de pensar que es un trabajo en el que se debe invertir mucho tiempo, la necesidad de ser acerca de un tema atractivo es fundamental. En mi caso, es el tema más atractivo de entre todos los que tenía en mente, y el hecho de ser un terreno desconocido para mí, lo hacía más interesante y arriesgado a la vez. En este aspecto ha sido una decisión arriesgada, ya que además de no tener muchos conocimientos de acústica, la gran parte del trabajo es experimental, y podría darse el caso de que los resultados obtenidos no fueran los esperados. Aun así, era el tema sobre el que quería estudiar y hacer mi TFG, principalmente por la motivación.

Motivación

La motivación por este trabajo viene dada por varios factores. El principal es que soy guitarrista desde hace muchos años y es mi gran pasión, pero además el hecho de que la acústica sea un terreno desconocido le añade puntos de motivación. Poder juntar la ingeniería con mi mayor pasión en este trabajo es, sin duda, una oportunidad única para tener más criterio y conocimiento en ambos ámbitos, y por supuesto un añadido a la hora de emprender este proyecto.

Requerimientos previos

Para realizar este proyecto, ha sido necesario realizar unos pasos previos antes de ponerme a redactar y realizar ensayos. He tenido que adquirir una base teórica acerca de la acústica, ya que es un terreno desconocido para mí, pues en la universidad no se da opción de hacer ninguna asignatura ni rama de la especialidad en acústica. Gracias a la obtención de varios libros acerca de la construcción, estudio acústico y características de la guitarra he ido adquiriendo unos conocimientos previos que han sido indispensables en la elaboración de este proyecto.

INTRODUCCIÓN

Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es hacer un estudio de la calidad sonora de la guitarra española. Para ello, primero debemos entender el comportamiento dinámico de la guitarra, conociendo su estructura, métodos de construcción y el papel que juega cada componente de la guitarra en su sonido.

Posteriormente, se pretende realizar unos ensayos en los que podamos relacionar características sonoras de la guitarra con sus representaciones gráficas y ver si es posible valorar la calidad de una guitarra mediante su espectro y envolvente.

Actualmente la manera de valorar una guitarra consiste en un equipo de expertos que valora subjetivamente cada guitarra y haciendo unas votaciones para clasificarlas. El objetivo es relacionar este concepto con el análisis de las mediciones realizadas.

Alcance del trabajo

El hecho de definir la calidad de una guitarra, es muy controvertido, ya que cada persona puede valorar la misma guitarra de maneras distintas, no existen guitarras buenas y guitarras malas dentro de una misma gama, sino guitarras que poseen matices que gustan más a cada usuario y no debemos obviar este hecho.

Por ello el alcance de este trabajo es relacionar esas propiedades como la nitidez, la duración, la calidez o la brillantez con sus representaciones gráficas y estudiar si esas propiedades quedan plasmadas en su envolvente o espectro.

Debemos ser conscientes que es posible que no lleguemos a relacionar estos conceptos, ya que se trata de un trabajo experimental, pero asumiendo los riesgos no he dudado en adentrarme en este proyecto.

INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

La música tiene su origen en la búsqueda de un lenguaje de comunicación, unos 40.000 años atrás, cuando el Homo Sapiens era capaz de imitar los sonidos de la naturaleza y diferenciarlos de los que constituían la estructura de su lenguaje [1]. La música parte de la capacidad del hombre de distinguir diferentes alturas de sonido. A partir de ello los prehistóricos empezaron a crear las primeras exposiciones musicales como rituales funerarios, cacerías y ceremonias. Empezaron a desarrollar diferentes maneras de generar sonidos, dándose cuenta de que podían reproducir sonidos de la naturaleza con algunos objetos de la propia naturaleza. Los dos principales recursos que desarrollaron fueron instrumentos (principalmente de percusión) y la voz humana.

En la prehistoria existían 3 grupos de instrumentos.

- Autófonos: ruido que se emite al golpear dos objetos (piedra y madera)



Ilustración 1

- Membranófonos: instrumentos hechos por el hombre al estirar una membrana y golpear-la con cualquier objeto. Es lo que vendría a ser un tambor.



Ilustración 2

- Aerófobos: Sonido que se origina por la vibración de una columna de aire.



Ilustración 3

Todas las teorías acerca de la historia de la música están basadas en hallazgos arqueológicos de antiguos instrumentos encontrados por todo el mundo [2].

Durante la Edad Antigua se empezó a usar el metal para crear instrumentos y aparecen los primeros cuernos que darían lugar a trompas y trompetas. Egipto, China, Grecia y Roma son los lugares en los que se más se desarrollaron estos instrumentos, como liras, arpas, laúd, flautas, xilófonos etc. En Roma concretamente se le dio gran importancia al órgano, importado de Alejandría. Debemos tener en cuenta que el sistema musical griego es antecesor del nuestro actual

Durante la Edad Media el órgano pasa a ser un instrumento religioso y de suma importancia, aunque a pesar de las restricciones impuestas por la religión muchos trovadores y juglares usaban instrumentos de percusión y de cuerda.

En la evolución de la construcción de los antiguos instrumentos, a partir del laúd que nos trajeron los árabes en el s VIII, no se percibe ninguna modificación hasta la segunda mitad del s XVI, momento en el que aparece una guitarra de cinco órdenes de cuerdas. Como hemos dicho, la guitarra proviene del laúd (3 cuerdas) y es en el s XVI cuando Alonso Mudarra (Sevilla) le introduce la cuarta cuerda por primera vez en su obra *Tres libros de música en cifra para vihuela*. A finales del s XVI Juan Carlos Amat publica el tratado más antiguo de la guitarra española con el título *Guitarra española de cinco órdenes*. Se le atribuye esa 5ª cuerda a Vicente Martínez Espinel, nacido en Ronda (Málaga), en el año 1550, al cual también se le debe el sistema de afinado de la guitarra por equisonos, que no sólo es el actual sino el más perfecto, por la resolución del oído humano para comparar sonidos.



Ilustración 4

La guitarra fue adquiriendo mucha importancia durante los siglos XVII y XVIII gracias a nombres como Gaspar Sanz, Amat, Nicola Doici. Fue en el s XVIII cuando llegó la gran evolución de la guitarra. En el año 1760 fray Miguel García (conocido como padre Basilio) presentó por primera vez una guitarra de 6 cuerdas. Como consecuencia del enriquecimiento musical que adquirió la guitarra empezaron a aparecer guitarras de siete, ocho, doce y veinte cuerdas, de dos mangos... pero todos estos instrumentos quedaron como reliquias porque ninguno tenía más posibilidades musicales que la guitarra de seis cuerdas [3]. La evolución de la guitarra estuvo principalmente en manos de la iglesia ya que su desarrollo se debe a gente como Dionisio Aguado (discípulo del Padre Basilio), Fernando Sor...

Fue principalmente en Granada donde empezaron a aparecer las primeras escuelas de guitarreros. La primera de ellas la inició Rafael Vallejo en Baza (Granada), en el año 1792. Le siguieron otros constructores artesanos como José Ortega, Benito Ferrer, Agustín Caro Riaño, José Pernas, Antonio Llorente y los hermanos Valle. Pese a esta evolución, el desarrollo de la guitarra quedó afectado por la aparición del piano, instrumento que se tomó como patrón. A partir de ahí la guitarra paró a la taberna, con el objeto de acompañar a la voz.

La segunda mitad del s XIX tuvo un resurgimiento de la mano de Antonio Torres Jurado (1817 – 1892) nacido en Almería. Seguramente es el nombre más conocido en el ámbito de la guitarra, ya que abrió el primer taller de guitarras en Sevilla, en la calle de Cerrajerías, 32.

Rediseñó la guitarra española y le dio una nueva silueta que se mantiene hasta la actualidad. Este rediseño comportó un aumento de la potencia sonora al haber aumentado la superficie vibrante de la tapa armónica. También estudió el sistema de barras armónicas y llevó los trastes del diapasón hasta la boca de la guitarra. Además fijó en 650 mm la longitud de las cuerdas, puso la cejuela del puente, e inventó el clavijero metálico. En resumen, se conoce a Torres como el padre de la guitarra española, comparable con Antonio Stradivari respecto al violín, ya que estableció un patrón de guitarras con unas condiciones acústicas y ergonómicas mucho mejor que todas las guitarras que se habían fabricado hasta el momento.



Il·lustració 5

Así como Antonio Torres estableció la manera de fabricar una guitarra con unas condiciones acústicas muy buenas, Francisco de Tárrega demostró por primera vez todas las posibilidades musicales de la guitarra. Tárrega nació en Castellón (1854-1909) y obtuvo una armonización perfecta de la guitarra y movió a los músicos más importantes a componer para guitarra.

Todos los conocimientos de Tárrega fueron recogidos y ampliados por el maestro más ilustre de todos los tiempos, Andrés Segovia, que nació en Linares (Jaén) en el año 1893. A parte de ser un magnífico guitarrista con una técnica nunca vista hasta el momento, Andrés Segovia también aportó en mejorar la guitarra que había diseñado Antonio Torres con el objeto de mejorar la potencia acústica para llegar al público en grandes salas de concierto. Esto le animó a buscar más avances para intentar mejorar la amplificación natural de la guitarra. Trabajó con fabricantes y ayudó a diseñar la guitarra clásica que hoy conocemos, construida con madera de más calidad y con cuerdas de nailon. También modificó ligeramente la forma de la guitarra para mejorar la acústica [4].

En resumen podemos observar la gran evolución que ha tenido la guitarra desde que se inventó a partir del laúd hasta estos momentos. La guitarra española ha derivado en dos principales movimientos, que a su vez conllevan ser tocados por guitarras con matices distintos, la guitarra clásica y la guitarra flamenca. Son guitarras prácticamente iguales, con la salvedad del tipo de madera con el que son construidas y en algunos casos variando muy poco la geometría. La guitarra flamenca se populariza en gran manera por todo el mundo gracias a la revelación de guitarristas como Paco de Lucía, Manolo Sanlúcar, Paco Cepero... y ha supuesto que la guitarra pase a ser uno de los instrumentos más universales.

Historia de la acústica

La investigación científica de la acústica es relativamente reciente, pero en su momento Aristóteles, Arquímedes, Lucrecio y Viturbio ya empezaron a indagar acerca de la contaminación acústica con el objetivo de mejorar la acústica en los teatros griegos. Aristóteles hizo una primera observación que sirvió como punto de partida para el estudio de la sonoridad:

“¿Por qué cuando se extiende paja sobre la orquesta de un teatro, el coro parece menos sonoro? ¿Es a causa de la rugosidad producida por la paja, qué la voz no encuentra el suelo suave y uniforme cuando llega hasta él, y en consecuencia pierde volumen a causa de las discontinuidades”?

A partir de esta afirmación varios físicos y científicos como Arquímedes, Lucrecio y Viturbio empezaron a buscarle explicación a estos fenómenos.

Arquímedes de Siracusa se dio cuenta que el estudio de la acústica estaba muy ligada con el estudio de los fenómenos ópticos. Gracias a este aporte Herón indicó que el ángulo de incidencia al chocar el sonido contra un sólido era igual al ángulo de reflexión.

Todos estos principios acústicos fueron llevados a la práctica en el diseño del Teatro Griego. Los griegos fueron los primeros en considerar que la acústica y visibilidad son dos conceptos que van intrínsecamente ligados. Los teatros solían estar situados en depresiones del terreno aprovechando la pendiente natural de las colinas en la que se excavaban los graderíos. Éstos graderíos estaban dispuestos de forma semicircular en el plano horizontal y elevándose con una pendiente variable muy similar a la imagen de una esfera. Gracias a estos criterios llegaron a construir teatros tan impresionantes como el Teatro de Dionisios (Atenas) con capacidad de hasta diecisiete mil espectadores. Los romanos cogieron el testigo de los griegos y construyeron inmensos teatros basados en los griegos, que derivaron a los anfiteatros, con la idea de unir dos teatros acoplándolos de manera que dibujaran una circunferencia.

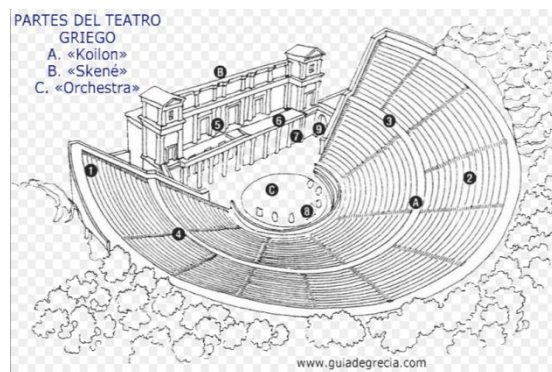


Ilustración 6

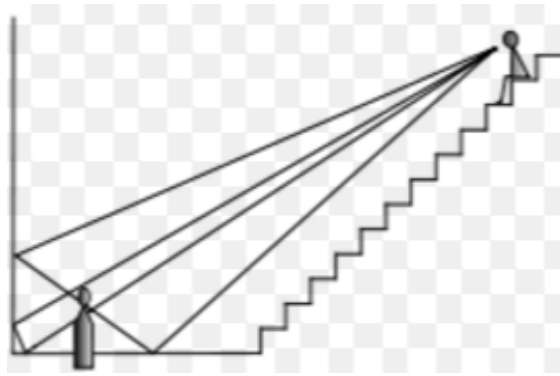


Ilustración 7

Lucrecio redactó el siguiente escrito en el que se explican fenómenos como la reverberación, transmisión y difracción del sonido [5]:

“Cuando el espacio a recorrer no es muy grande, la voz va desde el principio al fin de cada palabra y éstas pueden ser oídas con distinción, pero si el camino se hace más largo de lo adecuado, las palabras se escuchan de manera confusa. Una voz se dispersa repentinamente en varias voces, algunas golpean en la lejanía el aire sin efecto alguno, otras se estrellan contra los cuerpos sólidos y entonces retornan, con la imagen engañosa de una palabra. En los lugares solitarios, las grandes paredes de roca nos devuelven las palabras, así abofetean colina tras colina y se repite la reverberación. Todas las imágenes luminosas siguen un camino recto hacia delante una vez que se producen; aunque ninguno puede verlas si se sitúa detrás de una pared, en cambio sí que podrá oír las voces a través de ella. Pero aun cuando la voz sea capaz de superar la pared de una casa y penetrar en el oído, está embotada y confusa, y nos parece escuchar sonidos en vez de palabras.”

Posteriormente, Viturbio hizo una observación sobre el medio en el que se transmite el sonido, aspecto que no se había tratado hasta el momento, y que actualmente son conceptos fundamentales para la acústica de salas. Viturbio clasificó los medios mediante el cual puede propagarse el sonido en cuatro [6]:

- Disonantes (interferencia): Espacios donde inicialmente la voz se dirige hacia arriba y cuando es reflejada por algún cuerpo sólido interfiere en su caída con la ascensión de la siguiente palabra.
- Circunsonantes (reverberación): La voz se mueve en todas las direcciones y luego vuelve hacia el centro (donde se disuelve) haciendo confusos los finales de las frases.
- Resonantes (eco): La voz golpea con cuerpos sólidos dando lugar a ecos y hacen que las palabras se oigan repetidas.
- Consonantes (ideal acústico): Medio en el cual la voz se ve reforzada en todas sus características, y alcanza los oídos de los espectadores clara y distintamente.

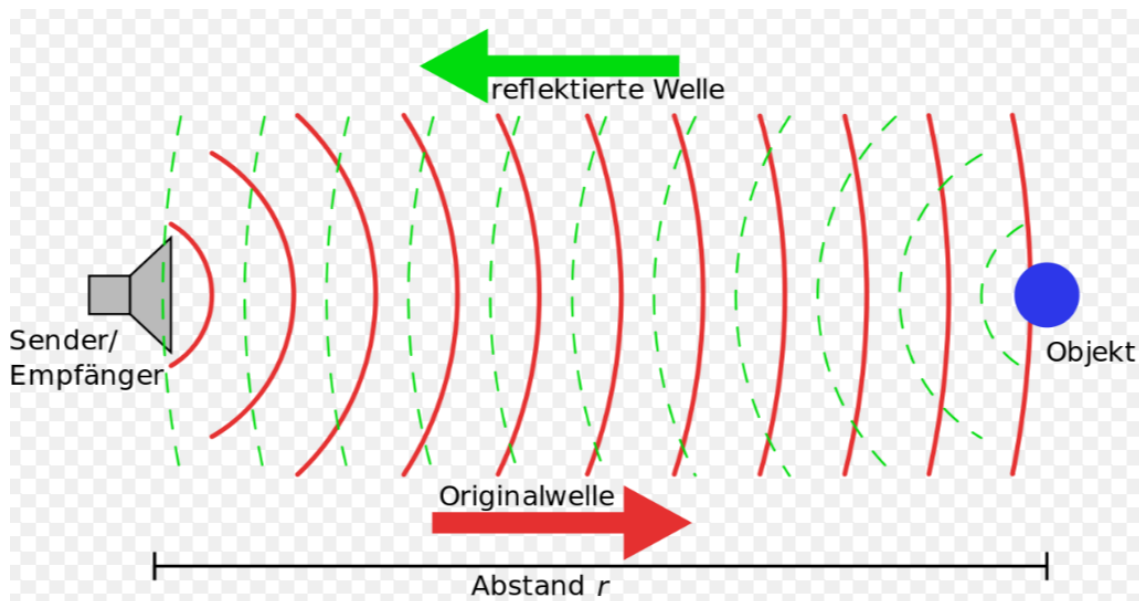


Ilustración 8

Viturbio hizo muchas aportaciones en la acústica en campos como la maquinaria militar, sobre la que aconseja cómo equilibrar el tiro de catapultas mediante el afinamiento de los tirantes; o el uso de vasos de bronce los cuales golpeaba al suelo y mediante el timbre de su sonido sabía si el enemigo estaba fabricando túneles para acceder al interior de las fortificaciones.

El comienzo de una nueva era llega de la mano de Leonardo da Vinci, que experimentó en el campo de la acústica, como también lo hizo en numerosos campos de la física (anatomía, dinámica de sólidos, fenómenos ópticos...). Leonardo comparó la propagación de ondas en el agua con respecto del sonido con la siguiente afirmación:

“¡En las dos instancias se cumple la misma ley de la Mecánica! Tal como las ondas en el agua provocadas por la caída de una piedra, así se comportan las ondas del sonido al viajar por el aire, cruzándose unas con otras sin mezclarse, y preservando su centro respectivamente como origen de cada sonido... Por lo tanto solo existe una ley de la Mecánica para todas las manifestaciones de la Fuerza”



Ilustración 9

Entre los siglos XVI y XVII, con la llegada de la imprenta, se estableció una base muy sólida de la mecánica y aparecieron los máximos exponentes de la física como Newton, Kepler, Brahe, Galileo... Tanto Hooke y Newton por la parte británica, como los hermanos Bernoulli del centro de Europa avanzaron mucho en el campo de la acústica. Newton predijo la velocidad del sonido (332 m/s a 0°C), y Banconi relacionó la temperatura con la velocidad del sonido, viendo que la velocidad aumenta a medida que la temperatura es más alta. Laplace solucionó el problema de la elasticidad de los fluidos en sus diferentes estados termodinámicos.

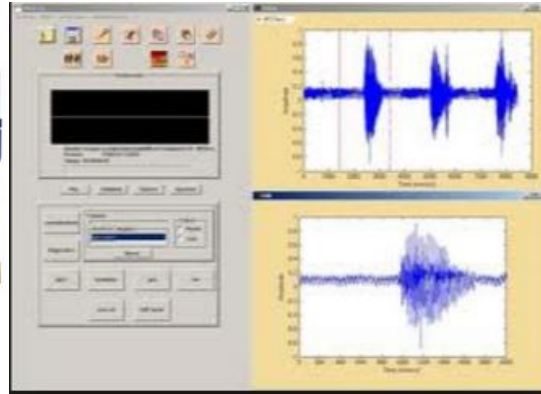
Acercándonos más a la actualidad, fue Lord Rayleigh el que se dio cuenta de que para estudiar la acústica debe hacerse considerándola como una síntesis de otras disciplinas como las matemáticas, el calor y muchas disciplinas más que forman parte del intercambio intelectual de la acústica moderna. Por eso podemos atribuir a Lord Rayleigh el punto de partida de la acústica moderna ya que en esa época (s XIX) ya se habían establecido unas bases en campos como la física y las matemáticas, dos disciplinas básicas para comprender el comportamiento de ondas sonoras vibratorias. Contemporáneo a Rayleigh, Helmholtz (Alemania) consolidó la acústica fisiológica y estudió el famoso resonador de Helmholtz [7].



Ilustración 10

Una vez aparecieron los instrumentos necesarios para la medición y análisis del sonido se alcanzaron nuevos niveles de precisión y sofisticación gracias a la electrónica y la informática. Gracias a ello se pudo aplicar la acústica en distintos campos como la arquitectura (que ya se había hecho antes de manera intuitiva), la electrónica, la medicina y la industria entre otros.

Actualmente la acústica tiene muchas ramas (la aeroacústica, la psicoacústica, la acústica ambiental, la bioacústica...) pero en este trabajo nos centraremos en la acústica musical, debido que el objeto de este proyecto es estudiar la calidad sonora de una guitarra española mediante aparatos de medida y procesamiento de señal.



Il·lustració 11

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ACÚSTICA

La acústica es una rama de la física que estudia la generación, propagación y propiedades del sonido. Entendemos como sonido a una propagación de ondas mecánicas longitudinales a través de cualquier medio elástico y continuo, ya sea sólido, líquido o gaseoso. Dichas ondas generan una vibración del material y estas vibraciones pueden generar un sonido audible o no.

Clasificaremos el sonido en tres grupos distintos; infrasonido, sonido audible y ultrasonido.

Definiremos un sonido audible como una variación temporal de la presión del aire bajo un cierto rango de frecuencias (20 Hz – 20kHz). Todas aquellas vibraciones que o bien superen los 20 kHz o sean inferior a 20 Hz no podrán ser percibidas por el oído humano.

Para definir el sonido explicaremos cuatro propiedades fundamentales que son la propagación, el tono, la intensidad y el timbre.

Propagación del sonido

- **Medio**

Existen dos formas en las que se puede propagar el sonido. Mediante ondas o mediante partículas.

Las partículas se comportan como pelotas microscópicas que se desplazan a gran velocidad. Cuando estas partículas llegan a nuestro oído, golpean contra el tímpano produciendo así la sensación de sonido.

La transmisión de sonido mediante ondas se caracterizan por tener movimientos periódicos. El paquete de ondas se propaga a lo largo del medio oscilando en torno a su punto de equilibrio. Podemos poner el ejemplo de una cuerda excitada por un movimiento vertical, que produce una deformación en la cuerda (paquete de ondas). Las ondas sinusoidales se forman desplazando verticalmente el extremo de la cuerda con un movimiento oscilatorio uniforme y se desplazan con velocidad constante a lo largo de la cuerda. Dependiendo del medio en el que nos encontremos ésa velocidad será distinta [8].



Il·lustració 12

El medio de propagación más común es el aire, donde el sonido viaja a unos 343 m/s; pero también puede propagarse por medios líquidos como el agua (1493 m/s) o sólidos como el aluminio (5100 m/s).

En el vacío es imposible que se pueda propagar el sonido, ya que su propagación involucra un transporte de energía (no de materia), y ya sabemos que para poder transportar energía es necesario disponer de un medio.

El medio de propagación del sonido más común es el aire que posee unas propiedades relevantes:

- La propagación es lineal, es decir, que diferentes ondas sonoras pueden propagarse por el mismo espacio al mismo tiempo sin que afectarse mutuamente.
- Es un medio no dispersivo, que significa que todas las ondas se propagan a la misma velocidad independientemente de su frecuencia o amplitud.
- Es un medio homogéneo, por lo que el sonido se propaga esféricamente, en todas las direcciones, generando un campo sonoro

A continuación podemos ver algunos ejemplos de la velocidad de propagación en distintos medios [9]:

Gases

Material	velocidad (m/s)
Hidrógeno (0°C)	1286
Helio (0°C)	972
Aire (20°C)	343
Aire (0°C)	331

Tabla 1

Líquidos (a 25°C)

Material	velocidad (m/s)
Glicerina	1904
Agua marina	1533
Agua	1493
Mercurio	1450
Queroseno	1324
Alcohol metílico	1143
Tetracloruro de Carbono	926

Tabla 2

Sólidos

Material	velocidad (m/s)
Diamante	12000
Cristal Pyrex	5640
Hierro	5130
Aluminio	5100
Bronce	4700
Cobre	3560
Oro	3240
Lucite	2680
Plomo	1322
Goma	1600

Tabla 3

- **Velocidad**

Un cuerpo en oscilación provoca un movimiento en las moléculas de aire que lo rodean transmitiendo ese movimiento a las moléculas de aire vecinas. Estas moléculas entran en oscilación respecto a su punto de reposo.

Esta oscilación provoca una mayor concentración de moléculas en ciertas zonas del espacio y otra zona de condensación, en la que hay menor concentración de moléculas. Esto repercute en la densidad de dichas zonas, que genera cambios de presión estática en el aire.

En las siguientes figuras podemos observar las zonas de mayor y menor concentración de moléculas de aire en una onda sonora bajo un movimiento armónico simple.

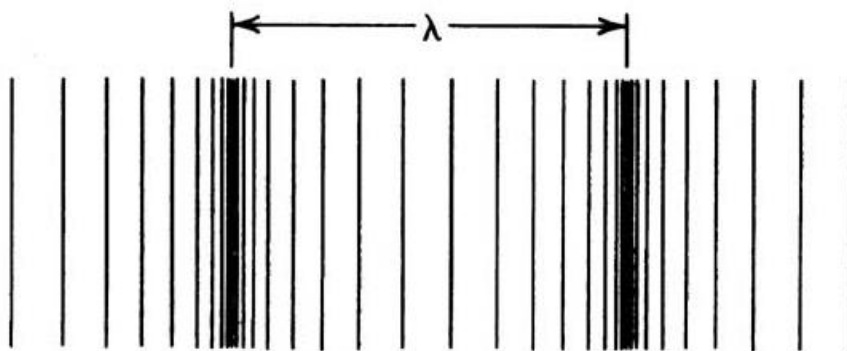


Ilustración 13

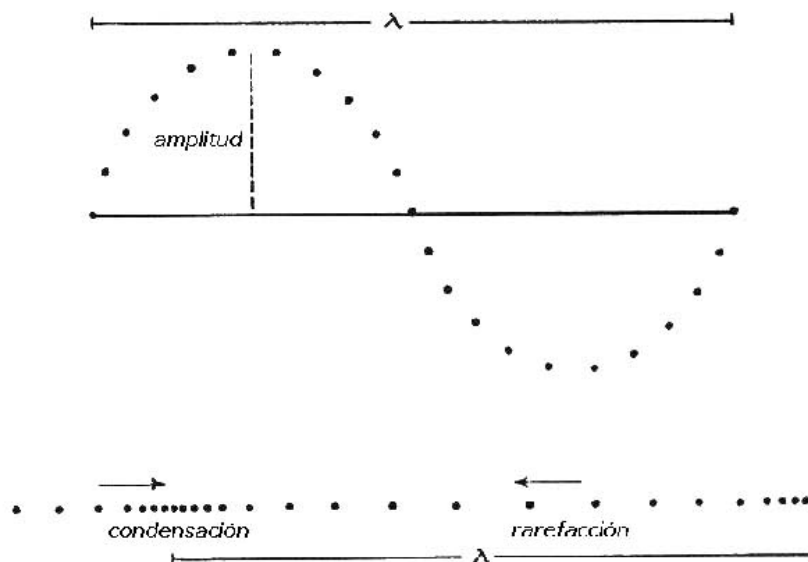


Ilustración 14

Figura 02.- Variación de la presión del aire en un movimiento armónico simple. Cada punto representa una molécula

La velocidad de propagación depende de diferentes variables según el medio en el que se esté propagando.

En medios gaseosos la velocidad de propagación depende de la presión del gas y de su densidad con razón de $v \propto \sqrt{\frac{p}{\rho}}$.

En un medio líquido la velocidad de propagación depende tanto de la compresibilidad ($1/K$) como de la densidad (ρ) con razón de $v \propto \sqrt{\frac{K}{\rho}}$. Podemos observar que cuanto más denso sea nuestro medio mayor será su velocidad de propagación, mientras que cuanto más compresible sea menor será su velocidad de propagación. En medios gaseosos la temperatura es un factor de suma importancia ya que influye tanto en la densidad como en la compresibilidad.

Por último en medios sólidos la velocidad depende del módulo del Young del material y de su densidad. $v \propto \sqrt{\frac{E}{\rho}}$.

La mayor velocidad de propagación se da en los cuerpos sólidos, mientras que la menor velocidad se da en los gases.

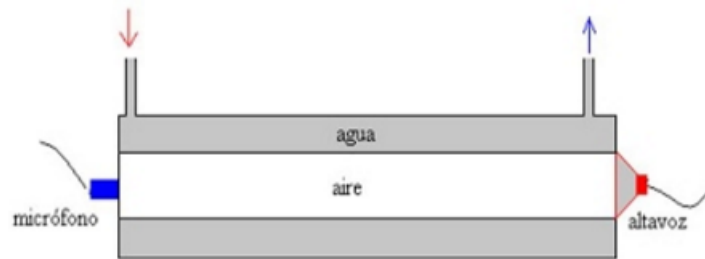
Como acabamos de ver la velocidad de propagación depende del medio, concretamente, de la densidad del medio. Ésta dependencia conlleva que la velocidad dependa intrínsecamente de la temperatura, especialmente en los gases. Recordando la ley de los gases ideales:

$$\rho = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}$$

Podemos observar que la densidad es inversamente proporcional a la temperatura, es decir, a mayor temperatura, menor densidad. Relacionándolo con lo mencionado anteriormente, a mayor temperatura mayor velocidad de propagación [10].

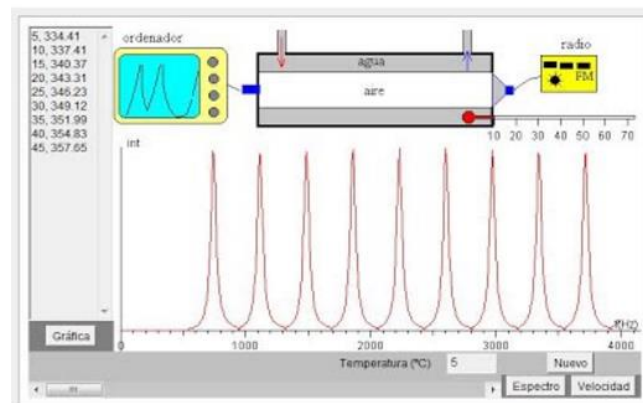
Podemos demostrar este razonamiento mediante un simple experimento sacado del portal de internet www.sc.ehu.es:

El experimento consta de dos tubos coaxiales de una cierta longitud L . En el interior del tubo circula aire y por el exterior circula agua a una temperatura t . Colocamos un altavoz en un extremo y un micrófono en el otro extremo. Conectamos el altavoz a un generador de sonido aleatorio y el micrófono a un ordenador para analizar la señal que nos llega.



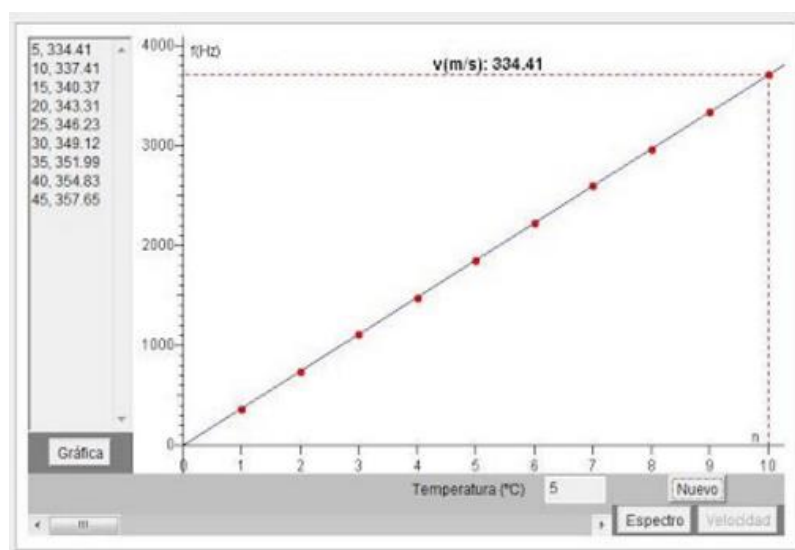
Il·lustració 15

A continuació se mostra la representació gràfica de la senyal rebida per el microfófono per a observar les freqüències corresponents a els pics de intensitat:



Il·lustració 16

Ahora podemos graficar la frecuencia correspondiente a los picos de amplitud frente al número de armónicos (a cierta temperatura), formando una recta lineal:



Il·lustració 17

Observamos que la regresión lineal de este experimento es $f = n \cdot \frac{v}{2 \cdot L}$ que corresponde con la ecuación de las ondas estacionarias de un tubo cerrado por los dos extremos o de una cuerda de longitud L sujeta por dos extremos.

Repetimos esta representación gráfica para un intervalo de temperaturas y obtenemos una correlación lineal entre la temperatura y la velocidad del sonido (en este caso para el aire):

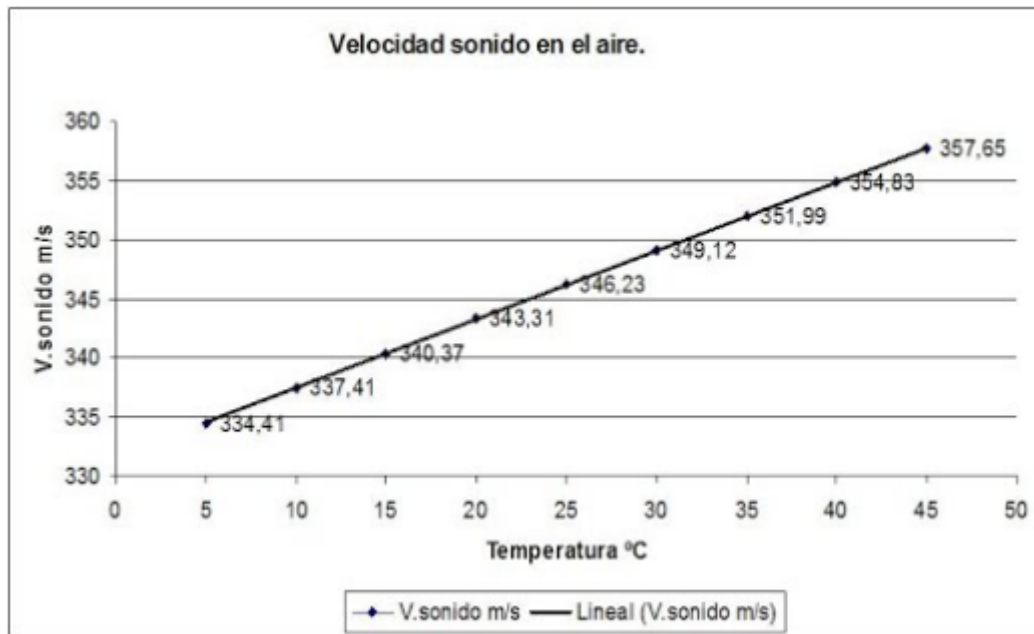


Ilustración 18

Podemos realizar éste experimento para cualquier medio, a cualquier temperatura, pero en este trabajo nos centraremos únicamente en medios gaseosos, concretamente el aire.

Tono

El tono es la cualidad que nos permite diferenciar un sonido agudo de uno grave. Dicha propiedad está relacionada directamente con la frecuencia. Contra mayor sea la frecuencia a la que oscila una onda, más agudo será el sonido que emite. Mientras que contra más grave sea un sonido menor será la frecuencia a la que oscila la onda.

Como hemos dicho anteriormente, para que un sonido sea perceptible para el oído humano debe estar comprendido en el rango de 20 Hz y 20 kHz.

Entendemos un tono puro como una onda sinusoidal que cumple la siguiente fórmula:

$$f(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi ft)$$

Siendo A la amplitud y f la frecuencia. El tono puro es un concepto ideal, ya que no existen en nuestro entorno, pero todos los sonidos que escuchamos corresponden a una superposición de tonos puros con distintas frecuencias y amplitudes para cada frecuencia. Existe la frecuencia fundamental y varios armónicos, correspondientes a múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. La frecuencia fundamental suele tener una mayor amplitud.

Musicalmente el tono de una nota corresponde a la frecuencia fundamental a la que oscila una onda sonora. Actualmente, se utiliza como referencia un $A(4)=440\text{Hz}$ para la afinación de instrumentos. La letra “A” significa la nota, dentro de la escala cromática. Se usa la “A” para el LA por ser la nota patrón, y las siguientes letras del abecedario (B,C,D,E,F,G) para el SI, DO, RE, MI, FA, SOL respectivamente.



Ilustración 19

El “4” significa en que octava nos encontramos. Siendo 0 la octava más grave audible y 10 la más aguda.

La nota más grave que podemos oír es $E(0)$ correspondiente a 20,602 Hz y $E(10)$ la nota más aguda correspondiente a 21.096 Hz. Seguramente no seremos capaces de escuchar con claridad estas dos notas, ya sea por la imperfección de nuestro sistema de audio o porque nuestro oído no sea capaz de percibirla.

El espectro audible (20 Hz – 20 kHz) lo dividimos en 10 octavas. Una octava es el intervalo que hay entre dos sonidos de tal manera que uno tiene el doble de frecuencia que el otro y corresponde a las doce notas de una escala musical cromática. Es decir, la escala musical no tiene una relación lineal entre nota y frecuencia, por el hecho de que entre una octava hay una relación del doble de frecuencia una nota respecto la otra. Tiene una relación exponencial (este tema se verá en apartados siguientes).

Reseña histórica

Como hemos dicho, actualmente el $A(4)=400$ Hz es nuestra nota patrón a la hora de afinar instrumentos, pero no siempre han sido 440 Hz.

Antes del s XX, no existía un patrón de afinación, en cada lugar había un sistema de afinación distinto. Se cree que los primeros órganos de Alemania en la época Medieval estaban afinados a $A(4)=567$ Hz, mientras ya entrados en el s XVI los instrumentos estaban afinados en $A(4)=377$ Hz. No existía ningún estándar, por lo que los músicos debían adaptarse a las afinaciones de cada lugar.

Durante el s XVIII aparecieron los primeros diapasones. Un diapasón consiste una horquilla metálica que cuando era golpeada resonaba a la afinación patrón. Generan un tono muy puro, cuya mayor parte de energía vibratoria está en la frecuencia fundamental, y en los armónicos la intensidad es muy baja, casi imperceptible. Fue inventado por John Shore, un sargento trompetista en 1711 (Inglaterra). Se conserva un diapasón inglés (que no se desafinaba con el paso del tiempo) que afinaba en $A(4)=380$ Hz, mientras que en la misma época, Bach afinaba sus órganos en 480 Hz, una diferencia de 4 semitonos. Se han encontrado otros diapasones como el de Händel (1740) que afinaba a 422,5 Hz, otro en 1780 afinado en 409 Hz y el de Mozart, que optaba por afinarlo a 422 Hz.

Durante el s XIX se intentó establecer un sistema de afinación universal, y muchas orquestas competían entre ellas para lograr el sonido más agudos y brillantes. En 1859 el gobierno francés dictó una ley en la que establecía el $A(4)$ a 435 Hz.

En 1896 la Sociedad Filarmónica de Londres decidió afinar sus instrumentos según la Ley que estableció el gobierno francés, y después de tocar un concierto se dieron cuenta de que por el incremento de temperatura, una afinación de 435 Hz a 15°C se transformaba a una afinación de 440 Hz a 20°C a causa de la diferencia de densidad del aire.

No fue hasta la década de los 40' cuando se estableció el estándar que conocemos actualmente gracias a la radio, que buscaban un sistema de estandarización, ya que el público estaba expuesto simultáneamente a muchas grabaciones y se estableció el $A(4)$ 440 Hz en 1939 en una conferencia internacional en Londres.



Aún hoy, se tienen dudas acerca de cuál es el sistema de afinación idóneo, ya que muchos expertos afirman que la afinación que resulta más agradable al oído por su naturaleza es la de $A(4)$ 432 Hz [11].

Ilustración 20

Más adelante, en el apartado de conceptos musicales profundizaremos más sobre este tema.

Frecuencia propia

Hemos definido la frecuencia propia en el ámbito musical, pero también se conoce como frecuencia propia o frecuencia de resonancia a aquella frecuencia que genera una máxima oscilación del cuerpo, es decir, que con una mínima excitación llegan a su máxima amplitud. En cuerpos sólidos la frecuencia de resonancia depende de su masa (m) y su rigidez (K):

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Si hablamos desde el punto de vista de la acústica, la frecuencia natural de un sonido es aquella frecuencia que predomina dentro de su espectro.

Intensidad

La intensidad es la propiedad que mide el volumen, la amplitud de la presión de un sonido.

La generación de ondas sonoras ocurre cuando la fuente hace que las moléculas del aire oscilen alrededor de su punto de equilibrio. Da lugar a variaciones de densidad y presión del aire como hemos visto anteriormente.

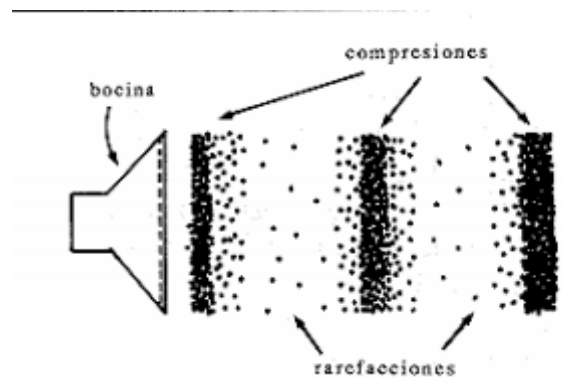


Ilustración 21

Existe una fórmula para expresar la variación de presión cuando una fuente emite una onda sonora:

$$\Delta p = \Delta p_o \cdot \sin(\omega t - kx)$$

En el Sistema Internacional la presión se mide en Pascales, pero en el mundo de la acústica se usa la medida del decibelio (dB). El decibelio es una propiedad distinta a las que estamos familiarizados, ya que es adimensional y logarítmico.

Existen muchas formas de definir el decibelio (mediante voltajes, presiones...). En este trabajo lo definiremos en base a las presiones. Empezaremos presentando la fórmula:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{P}{20} \right)$$

Como hemos dicho anteriormente el decibelio es una magnitud adimensional (relación de presiones) y logarítmica. Para establecer la relación de presiones se acude a dos valores. Un valor referencia que es 20 µPa que corresponde al umbral de audición, es decir, aquellas vibraciones que generen presiones inferiores a 20 µPa no seremos capaces de percibirlos. El segundo valor al que acudimos para calcular la intensidad de sonido, es la presión que genera dicho sonido que queremos medir (en micropascales) [12].

Existen tablas en las que podemos comparar distintos sonidos y su intensidad, y mediante estudios se ha llegado a la conclusión que el umbral del dolor generado por un sonido es de 20 Pa (20.000.000 Pa). Sustituyendo en la fórmula:

$$dB = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{20 \cdot 10^6}{20} \right) = 120 \text{ dB}$$

Es decir, 120 dB es la máxima intensidad de sonido que nuestro oído puede percibir sin dolor. A continuación se adjunta la tabla a la que se le ha hecho mención anteriormente:

140 dB	Umbral del dolor
130 dB	Avión despegando
120 dB	Motor de avión en marcha
110 dB	Concierto / Acto cívico
100 dB	Perforadora eléctrica
90 dB	Tráfico / Pelea de dos personas
80 dB	Tren
70 dB	Aspiradora
50 dB	Aglomeración de gente
40 dB	Conversación
20 dB	Biblioteca
10 dB	Respiración tranquila
0 dB	Umbral de audición

Tabla 4

Como podemos observar es difícil comparar dos sonidos mediante la magnitud del decibelio, ya que es logarítmica y un sonido que genere el doble de decibelios que otro no producirá la misma intensidad de sonido.

Por otra parte, la sensación sonora depende de la intensidad y de la frecuencia. En el siguiente gráfico podemos apreciar las líneas isofónicas (que provocan la misma sensación sonora) en función de la frecuencia y de la intensidad.

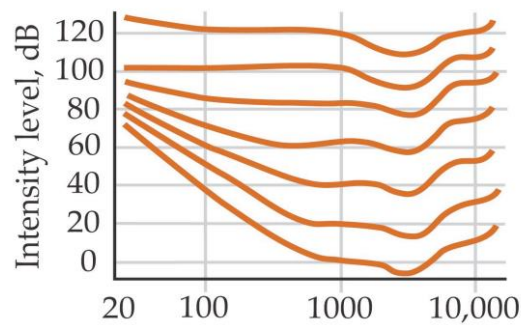


Ilustración 22

En la figura podemos apreciar dos curvas límites que corresponden al umbral de audición (curva inferior) y al umbral del dolor (curva superior).

El umbral de audición corresponde a la intensidad a 1000 Hz, 0 dB (se usa como referencia) y el umbral del dolor es asociado a los 1000 Hz (120 dB).

La localización auditiva es la percepción de la dirección de procedencia de un sonido, en el que intervienen ambos oídos. El oído más próximo a la fuente detecta un sonido de mayor intensidad. También depende de la frecuencia del sonido. Para $f < 1700$ Hz ($\lambda > 0.2$ m), llega a cada oído una parte diferente de la onda, pero si $f > 1700$ Hz ($\lambda < 0.2$ m) la intensidad es mucho mayor en el oído más cercano a la fuente. Esto es debido a que la frecuencia límite corresponde con la frecuencia cuya longitud de onda es del orden del tamaño de la cabeza. Para los humanos es aproximadamente 0,2m. Para otros animales es distinta, a continuación vemos un gráfico con la frecuencia límite para distintos animales [13]:

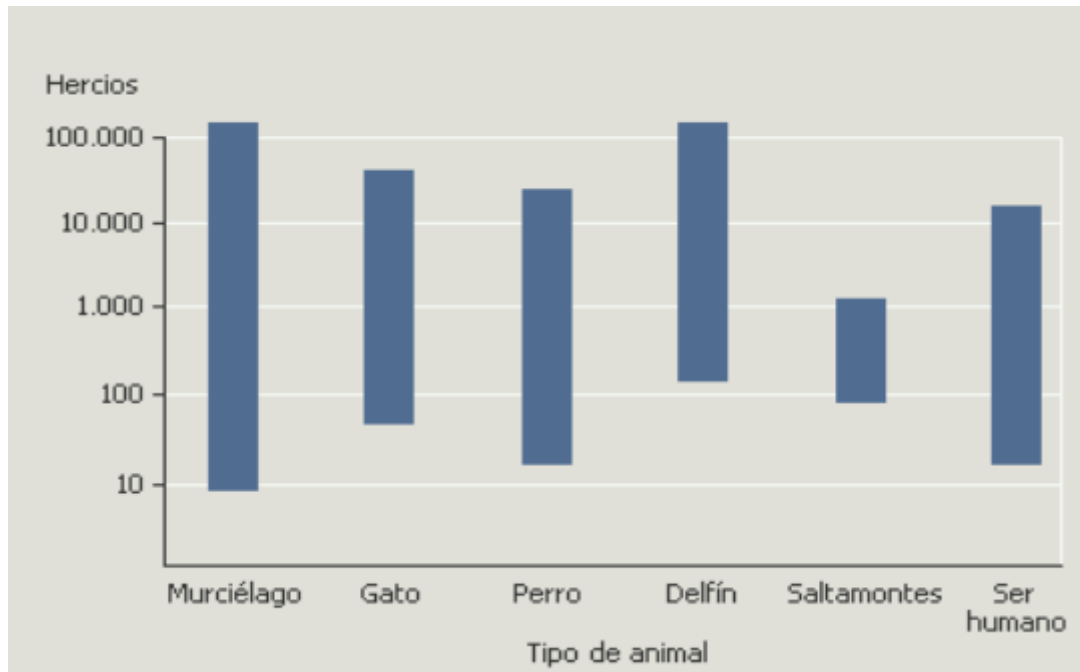


Ilustración 23

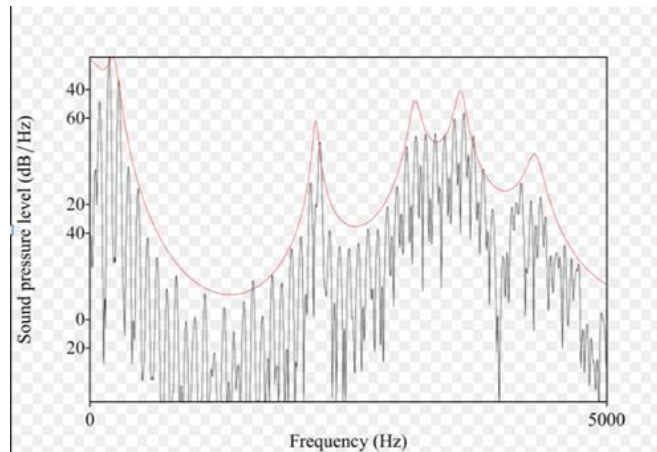
Timbre

Probablemente, el timbre es la cualidad más difícil de definir, de estudiar y de medir en la acústica. El timbre es la propiedad que nos permite distinguir dos sonidos distintos de igual tono y amplitud.

El timbre de un sonido está caracterizado por dos de sus representaciones. Su espectro y su envolvente.

Espectro sonoro

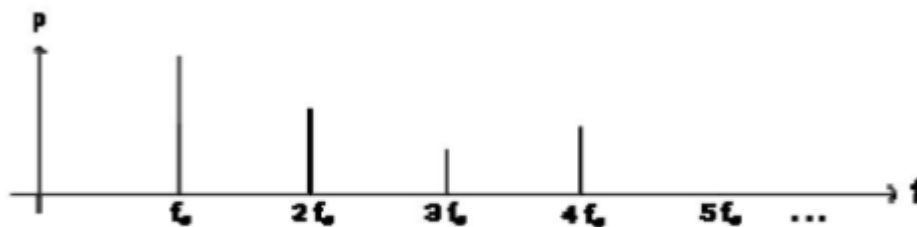
El espectro es una representación del sonido que nos da información acerca de qué frecuencias integran un sonido y cuáles son sus respectivas amplitudes o fase. Se le llama tono puro a aquel sonido que solo tiene amplitud en su frecuencia fundamental. Este sonido es muy difícil de encontrar en la naturaleza. Podemos expresar cualquier sonido como una superposición de distintos tonos puros (con distintas frecuencias fundamentales).



Il·lustració 24

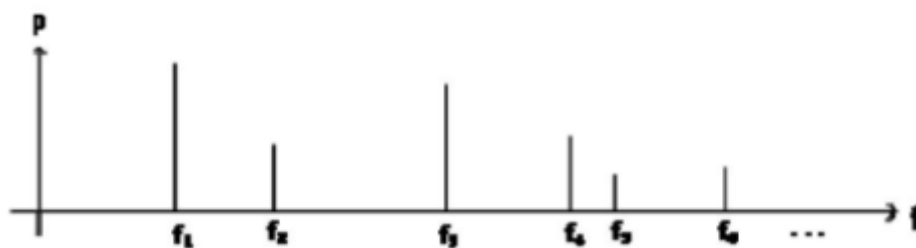
Podemos clasificar los espectros en cuatro tipos [14]:

- Sonidos discretos periódicos: El espectro está formado por líneas verticales equidistantes entre sí. La primera línea corresponde a la frecuencia fundamental y las sucesivas a sus armónicos (segundo, tercero...) por orden. La altura de la línea vertical corresponde a la amplitud del armónico respectivo.



Il·lustració 25

- Sonidos discretos no periódicos: Su espectro es muy similar al anterior con la particularidad de que las líneas verticales no son equidistantes entre sí.



Il·lustració 26

- Sonidos de espectro continuo: Corresponden a espectros con líneas verticales en casi todas las frecuencias, es decir una gama continua de frecuencias. En este caso no es un espectro periódico. A la hora de representarlo gráficamente es más cómodo usar la densidad espectral (energía por unidad de frecuencia).



Ilustración 27

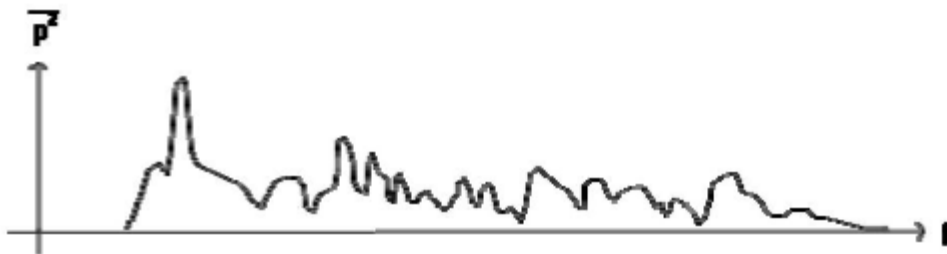


Ilustración 28

- Espectro mixto: Es la superposición de un sonido de espectro continuo y uno o más de espectro discreto. Este tipo de sonido corresponde a la mayoría de sonidos que percibimos de nuestro entorno.

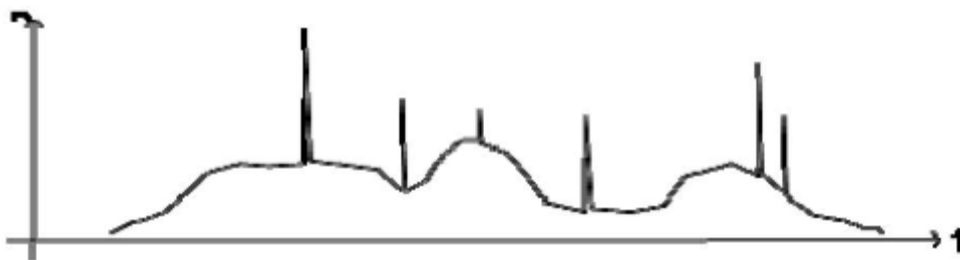


Ilustración 29

Curiosidad

Existen dos espectros muy representativos en el mundo de la acústica. El primero de ellos es el espectro del ruido blanco, en el que todas las frecuencias tienen la misma intensidad. El espectro asociado a ese ruido es una línea recta constante para todas las frecuencias.



Ilustración 30

Otro espectro muy característico es el ruido rosa. Tiene una representación espectral proporcional a $1/f$, es decir, a medida que aumenta la frecuencia, la intensidad disminuye de manera inversa. Su espectro tiene el siguiente aspecto:

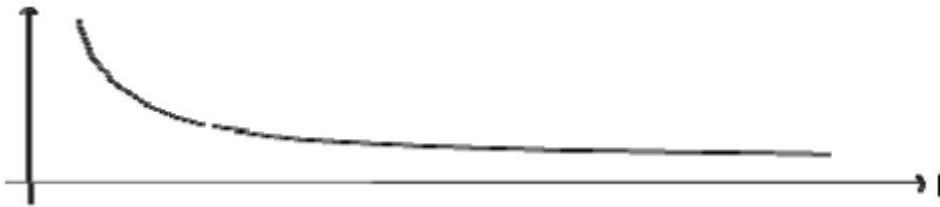


Ilustración 31

La asociación de ruidos con colores se debe a la similitud de su comportamiento con los colores. Sabemos que la luz blanca es la superposición de todos los colores con la misma intensidad, y la luz rosa contiene todos los colores pero el rojo con mayor intensidad.

El ruido rosa se utiliza mucho en el mundo de la acústica como señal de prueba para ensayos acústicos, ya que sirve como patrón y permite comparar mediciones en distintos puntos y ambientes.

Envolvente sonora

La envolvente de un sonido consiste en una manera de definir la evolución temporal en amplitud de cualquier sonido, en términos de cuatro parámetros:

- Ataque: Lo que tarda en escucharse el sonido después de haber sido emitido o ejecutado
- Decaimiento: Tiempo que tarda la amplitud en reducirse a la de sostenimiento, una vez alcanzada la amplitud máxima.
- Sostenimiento: Amplitud que se mantiene constante hasta que deja de inducir vibración
- Relajación: Tiempo que tarda el sonido en perder toda su amplitud una vez se ha dejado de emitir.

El timbre es una propiedad dinámica, es decir, es un fenómeno en constante evolución. En cada instante la forma de onda es distinta.

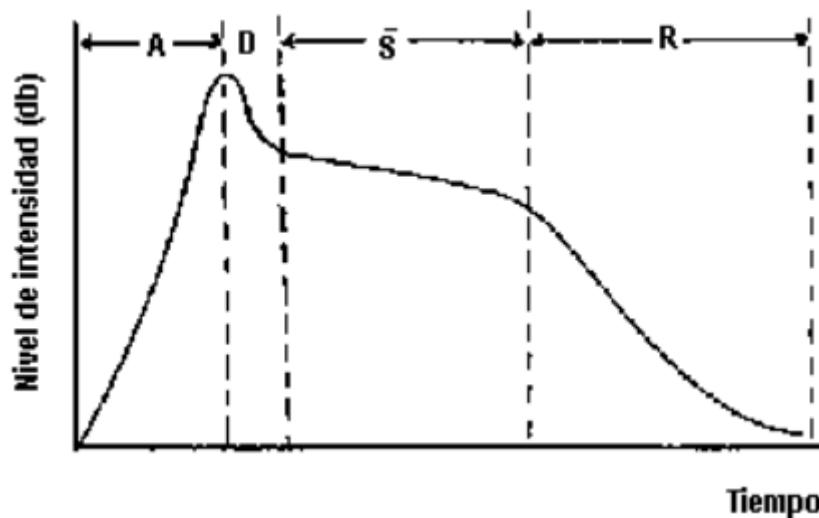


Ilustración 32

Para finalizar podemos concluir que el timbre de un sonido lo caracterizan su espectro (representación amplitud o fase respecto de la frecuencia) y su envolvente (representación gráfica de la amplitud respecto del tiempo).

El timbre es el motivo de estudio de este trabajo, ya que la finalidad es llegar a relacionar la calidad del sonido con su representación espectral, por ello, este tema será tratado con más profundidad en el apartado "Calidad del sonido"

Duración

La duración de un sonido es una propiedad fácil de entender. Se denomina duración al espacio temporal que ocupa un sonido desde su aparición hasta su extinción. Existen sonidos largos, cortos y medianos. Con la combinación de distintas duraciones de sonido produciremos diferentes ritmos.

La duración natural de un sonido depende de la fuente de la que provenga. Existen instrumentos que producen sonidos largos como el violín, o el violoncelo. Hay otros instrumentos que producen sonidos de duración corta como un xilofón, las palmas...

Instrumentos como el piano o la guitarra (de cuerda percutida), la duración del sonido viene definida por el tiempo que la cuerda se mantiene vibrando (sonando). Esto depende del tipo de cuerda, de la calidad del instrumento...

Para finalizar el apartado de conceptos acústicos podemos mostrar una tabla en la que vemos las 4 propiedades del sonido y de qué parámetro físico dependen más [15]:

Parámetro físico					
Parámetro musical	Presión	Frecuencia	Espectro	Envolvente	Duración
Intensidad	ddd	d	d	d	d
Tono	d	ddd	d	d	d
Timbre	d	dd	ddd	dd	d
Duración	d	d	d	d	ddd
<div>ddd Fuertemente dependiente</div> <div>dd Dependiente</div> <div>d Débilmente dependiente</div>					

Ilustración 33

FENÓMENOS ACÚSTICOS

Por ser el sonido una onda longitudinal, presenta los fenómenos ondulatorios propios de ella. A continuación nos centraremos en los fenómenos acústicos que intervienen en nuestro objeto de trabajo que es la guitarra española:

Radiación del sonido

La radiación del sonido es el proceso de crear ondas de sonido y dejarlas propagarse sobre cualquier superficie. Una guitarra tiene dos fuentes de radiación, las placas vibrantes y la boca de la guitarra (agujero). Asumimos que la placa superior genera mucho más sonido que la inferior, ya que esta última tiene una función meramente estructural.

Cuando hablamos de una fuente de radiación de sonido, se habla de cuantos polos de radiación tiene. En la guitarra podremos tener un polo o dos polos de radiación.

Un monopolo, es un tipo de radiación en el que en desde un punto en concreto se emite radiación en todas las direcciones.

Un dipolo está formado por dos monopolos unidos. A continuación vemos imágenes de la radiación de un sonido dependiendo del número de polos que tenga [16,17].

Monopolo:

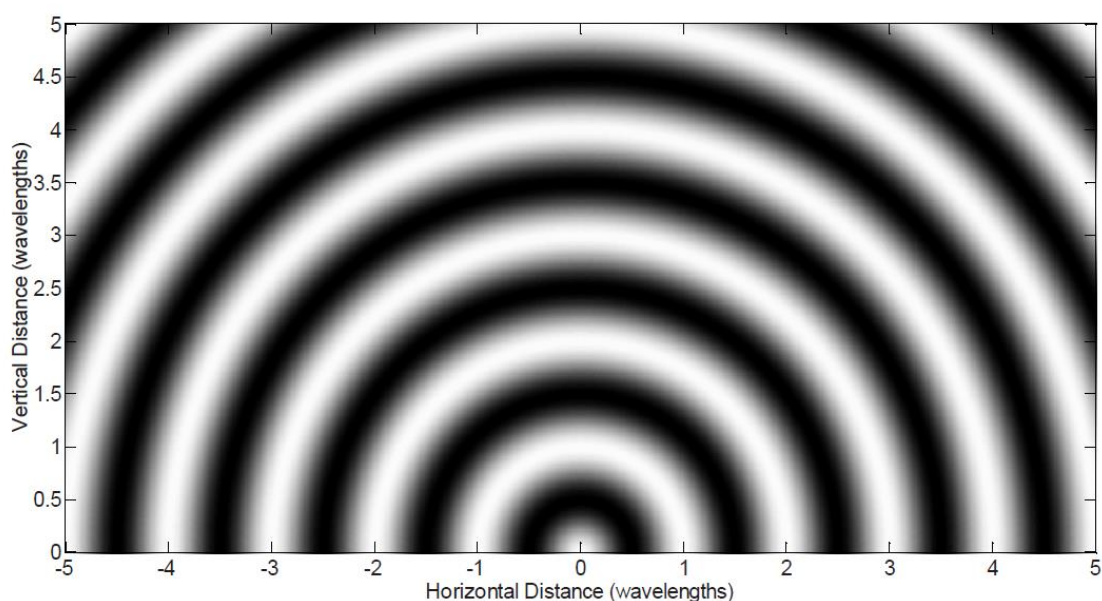
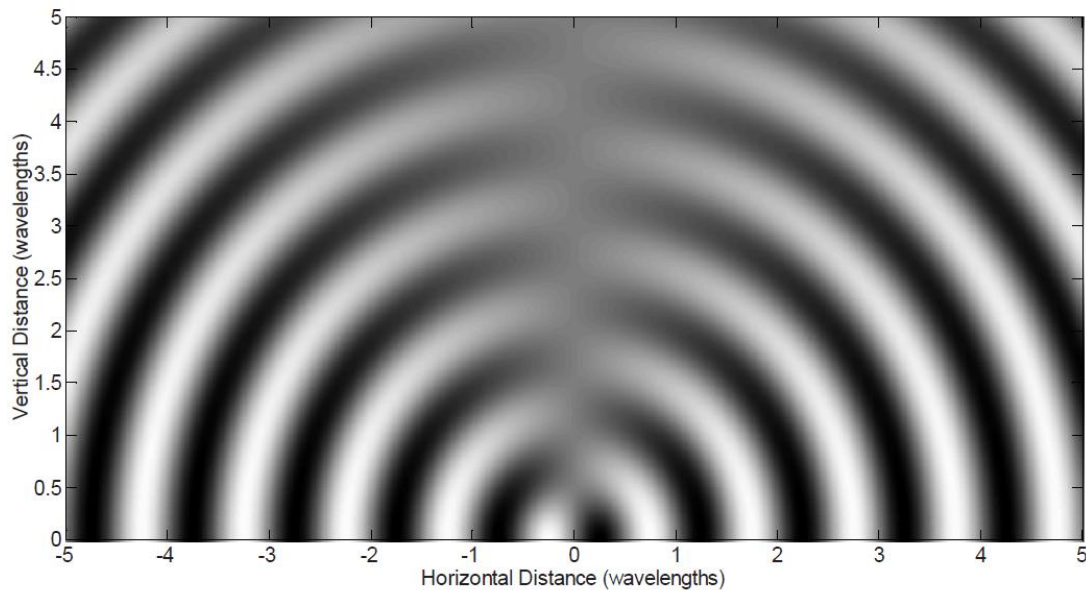


Ilustración 34

Dipolo:



Il·lustració 35

Podemos observar que en dipolo, hay una diferencia de fase de 180° entre ambos polos. Esto implica que si nos situamos en la línea de amplitud cero, no seríamos capaces de escuchar nada (asumiendo que no existen reflexiones).

La boca de la guitarra actúa siempre como un monopolo. Matemáticamente puede ser tratado como un pistón situado en el centro del monopolo. En las regiones cercanas al pistón el sonido se concentra en el movimiento del eje. En las regiones lejanas, el sonido es omnidireccional y es función del ángulo de fase del pistón [18].

La radiación acústica del cuerpo de la guitarra está condicionada por las formas modales de la placa vibrante. Es muy difícil de describir matemáticamente las formas modales de la placa vibrante de la guitarra, pero podemos simplificarlo considerando placas rectangulares.

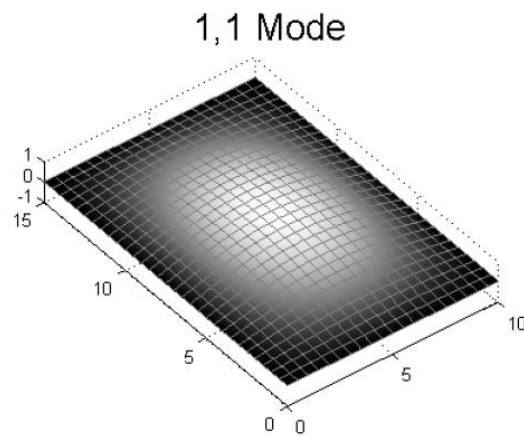
La distribución de velocidades para una placa de longitud de lados a y b es:

$$v(x, y) = V \cdot \sin\left(\frac{p\pi x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{q\pi y}{b}\right)$$

Donde V es la amplitud, p y q definen el número de antinodos en las direcciones x e y .

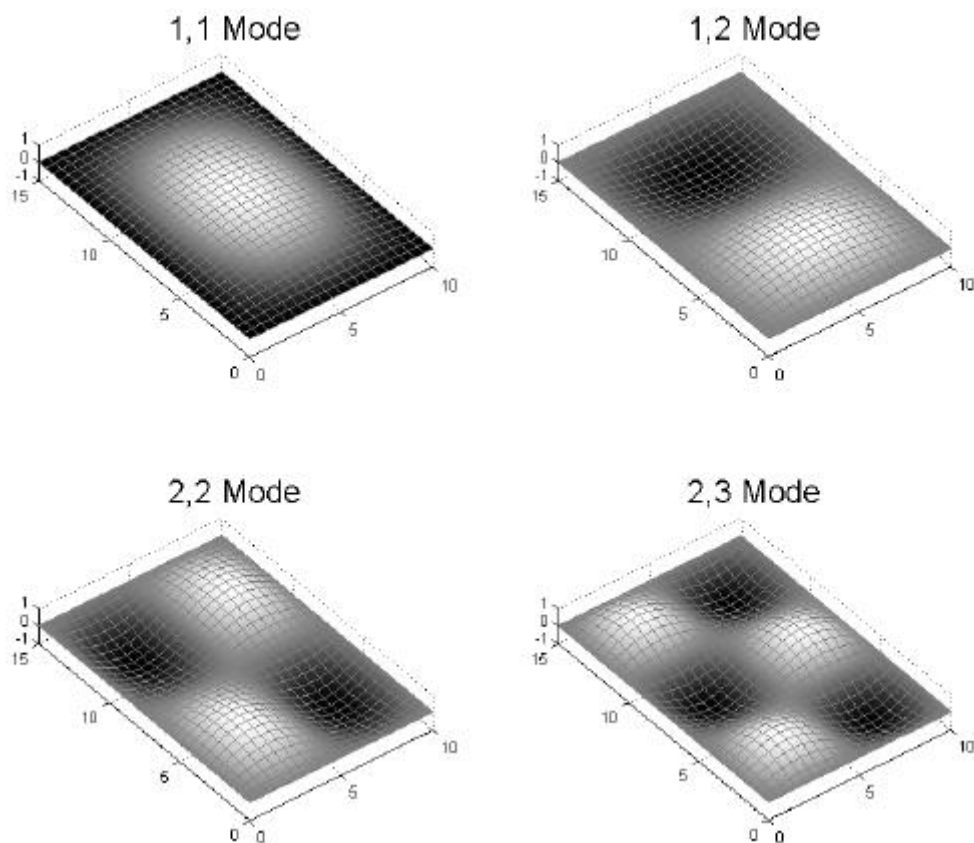
Un antinodo es aquel punto en el que la amplitud es máxima. Un nodo es lo contrario, un punto en el que la amplitud siempre es cero.

En la primera forma modal ($p=1$ y $q=1$) no existe una línea nodal interior, ya que solo tenemos un antinodo en ambas direcciones.



Il·lustració 36

Siguiendo este patrón encontramos muchas formas nodales que puede adoptar una placa vibrante:



Il·lustració 37

Observamos que los antinodos están desfasados 180° unos respecto sus contiguos, esto conlleva que las presiones que se ejercen en estos antinodos son de signo contrario entre ellos [18].

En la guitarra estas placas vibrantes las encontramos principalmente en la parte inferior al puente, ya que es la región que menos restricciones mecánicas tiene y tiene la suficiente movilidad como para ser un radiador de sonido eficaz a bajas frecuencias:



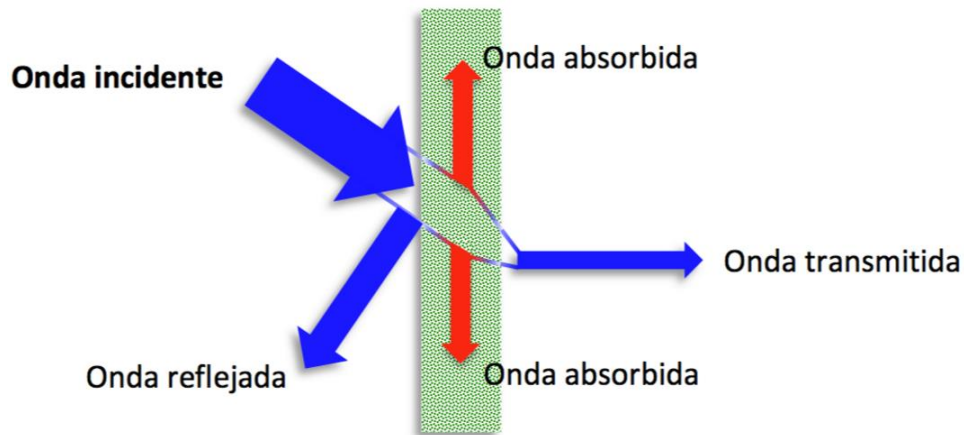
Ilustración 38

Absorción

El efecto de absorción de un sonido es debido a que los sólidos contra los que rebotan las ondas no son perfectamente rígidos (ideal) sino que tienen una cierta deformación al ser impactados por el sonido, y eso produce que absorban parte de la energía de la onda, devolviendo una energía menor a la que se ha emitido. Existe un parámetro para definir éste fenómeno, el coeficiente de absorción.

Sea E_i la energía de la onda incidente y E_r la energía de la onda reflejada, la diferencia entre estas dos energías (E_a) se denomina energía absorbida. Esta diferencia de energías es equivalente a la suma de energías disipadas y transmitidas por la pared:

$$E_a = E_i - E_r = E_d + E_t$$



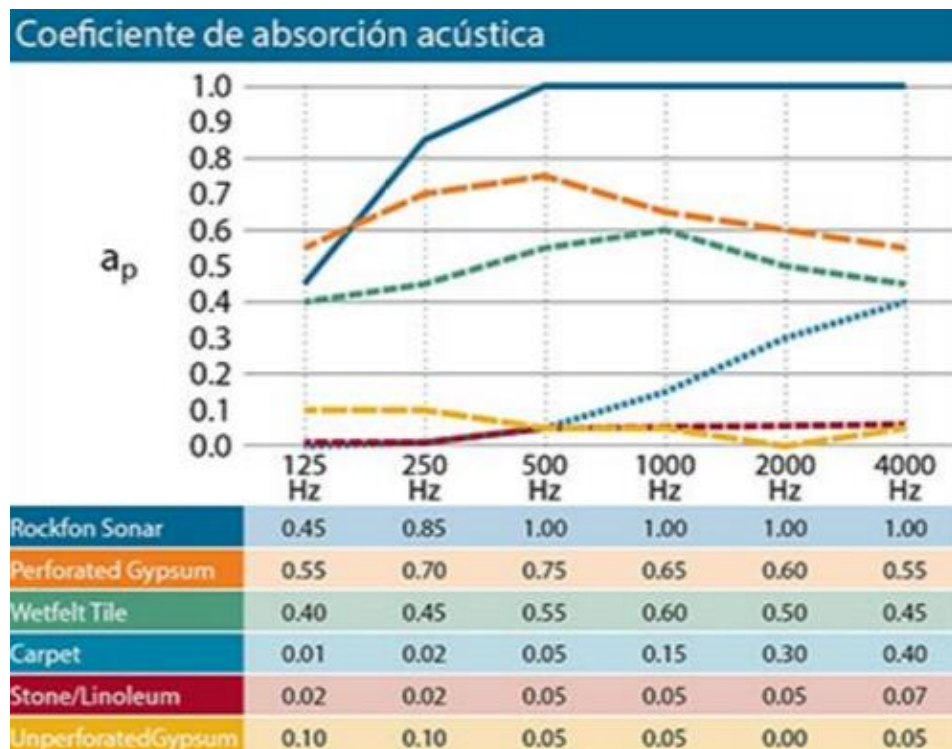
Il·lustració 39

Se define coeficiente de absorción como el coeficiente entre la energía absorbida y la energía emitida por la fuente:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i}$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$. El coeficiente de absorción es un parámetro que depende del material en el que refleja la onda y la frecuencia de la onda.

A continuación vemos un gráfico acompañado de una tabla en la que se muestra la variación del coeficiente de absorción dependiendo de la frecuencia y del material en la que refleja la onda [20].

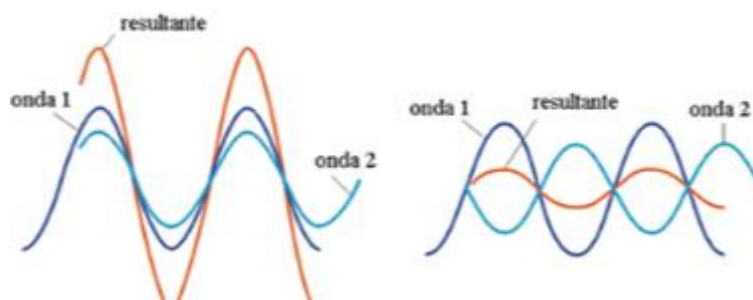


Il·lustració 40

Reflexió

La reflexió és un fenomen que ocorre en tot tipus de ondes com la llum, el so... Ocorre quan una ona rebota contra un cos amb un cert angle d'incidència, generant un angle de reflexió. Sempre es compleix que l'angle d'incidència és igual a l'angle de reflexió.

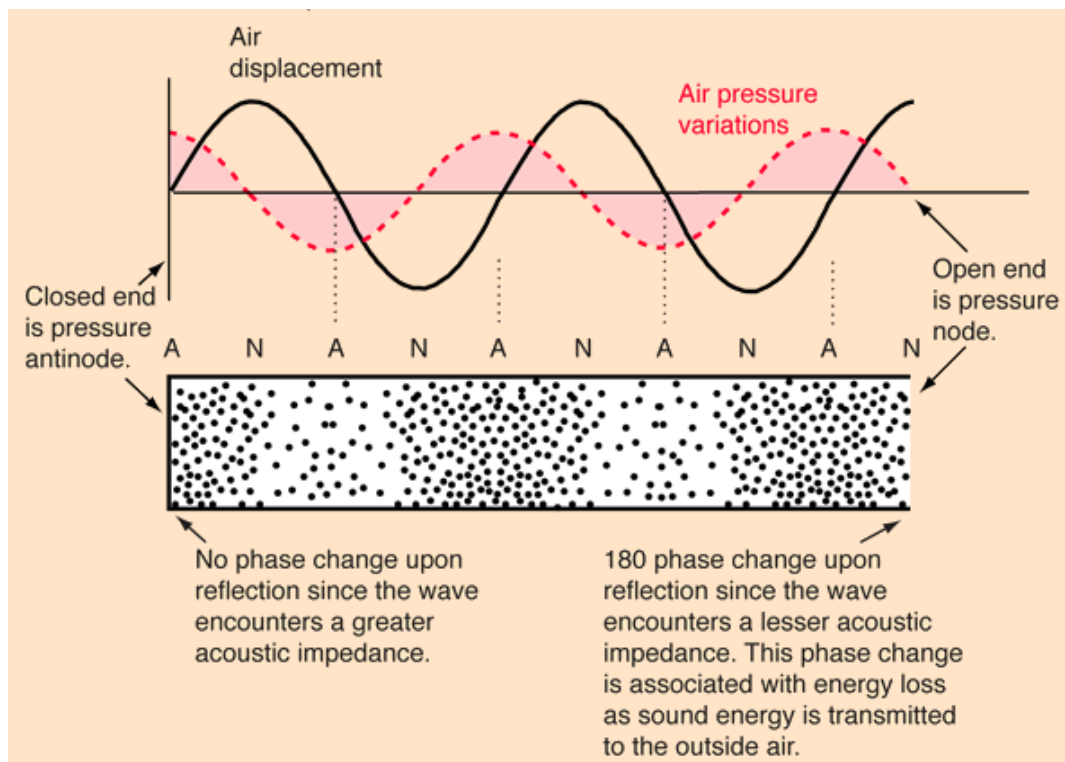
Estes ondes reflectides, poden interferir amb altres ondes incidents, produint patrons d'interferència constructiva i destructiva. A continuació veiem un exemple.



Il·lustració 41

Esto comporta que cuando una onda reflejada se suma a una onda incidente, la intensidad de sonido (amplitud) resultante es el doble en una zona cercana a la superficie. Esta duplicación de la presión da un incremento de 6 dB de la señal captada por un aparato receptor.

La fase de las ondas sonoras reflejadas y la reflexión de ondas de cuerdas por sus extremos, determinan si la interferencia será constructiva o destructiva. Cuando la onda reflejada y la incidente se mueven en sentidos opuestos se añaden la una a la otra, pero se pierde el aspecto de propagación, y la vibración resultante es a lo que llamamos onda estacionaria. La reflexión de una onda sonora contra una pared dura no produce un cambio de fase, a eso se le llama que la pared tiene una mayor impedancia acústica [21].



Il·lustració 42

Esto genera unos cambios de presión en el aire, que es lo que genera una mayor o menor intensidad de sonido.

La reflexión de un sonido provoca fenómenos muy conocidos como el eco. Para que el oído humano pueda distinguir el sonido emitido y el sonido reflejado debe haber una distancia mínima de 17 m entre la fuente de sonido y el objeto contra el que rebotan. Es por eso que para grandes salas de concierto, las paredes deben tener un suficiente coeficiente de absorción para que no se produzca eco y se escuchen los sonidos emitidos por una orquesta con total nitidez.

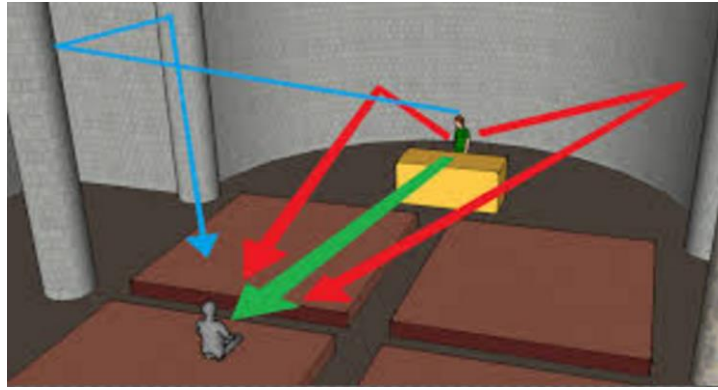


Ilustración 43

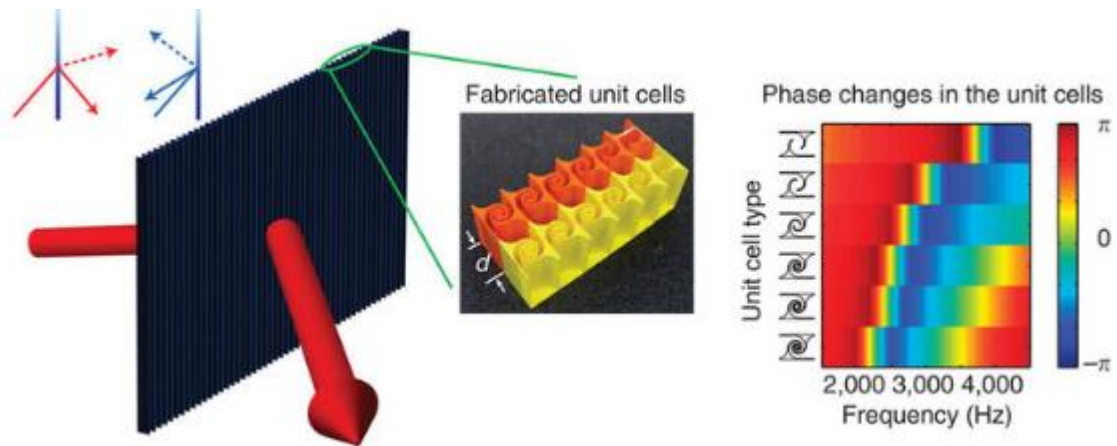
Otro fenómeno asociado a la reflexión es la reverberación, que se conoce como la prolongación del sonido percibido desde la sala una vez la fuente sonora haya dejado de emitir sonido. Es resultado de múltiples reflexiones no simultáneas sobre los planos de las diferentes paredes [22].

Refracción

Al igual que la reflexión, la refracción es un fenómeno que ocurre con todo tipo de ondas. Es el fenómeno que ocurre cuando una onda cambia de dirección y de velocidad al pasar de un medio a otro. Solo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación y si estos tienen índices de refracción distintos [23].

En la refracción intervienen tres elementos: el rayo incidente, la línea perpendicular a la superficie y el rayo refractado.

Si la onda pasa de un medio a otro en el que la onda viaja más rápido, el rayo refractado se acerca a la línea normal, mientras que si pasa de un medio a otro en el que la onda viaja más lento, el rayo se aleja a la normal.



Il·lustració 44

La refracció produeix un canvi de fase al traspasar la superfície contra la que incideix la ona sonora. Este desfase depèn de la freqüència de la ona incident i del tipus de cèl·lules unitàries que componen la superfície.

Difracció

La propietat de les ondes a rodar obstacles se denomina difracció. El cas més comú i més utilitzat per aprofitar la difracció és el de fer passar una ona sonora a través d'una obertura. Aquest fet fa que l'obertura es converti en un nou foc emissor de la ona. La magnitud d'aquest fenomen depèn de la relació que existeix entre la longitud d'ona i el mida de l'obertura.

Si una obertura és gran en comparació amb la longitud d'ona l'efecte de la difracció és imperceptible. Però si el mida de l'obertura és semblant a la longitud d'ona, els efectes de la difracció són grans i la ona no es propaga solament en la direcció dels raigs rectilíneus, sinó que es dispersa com si procedís d'una font puntual localitzada en el centre de l'obertura.

A continuació veiem un exemple gràfic de la diferència entre una obertura semblant a la longitud d'ona i el cas contrari:

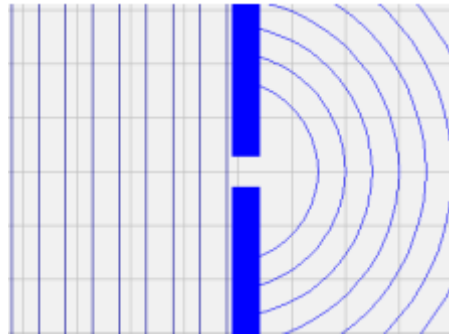


Ilustración 45

Vemos como la onda al pasar por el orificio se expande en todas direcciones creando así un foco emisor

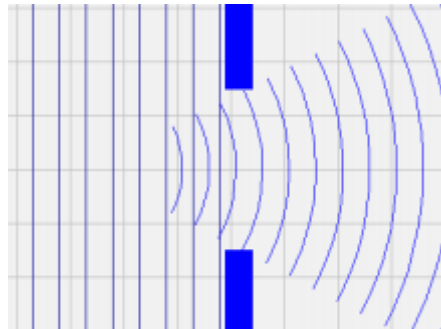


Ilustración 46

En este caso la apertura es mucho más grande que la longitud de onda y la dirección de la onda es lineal al traspasar el orificio y cuanto más se aleja más se dispersa la onda.

En el caso de obstáculos puntuales la onda siempre tiende a rodear el obstáculo. Las ondas de mayor frecuencia suelen tener una dirección más lineal, pero las ondas de baja frecuencia acostumbran a propagarse en todas direcciones [24].

El hecho de que la difracción es más pronunciada con longitudes de ondas mayores, implica que podemos escuchar bajas frecuencias alrededor de obstáculos mejor que las altas frecuencias.

Podemos ver un ejemplo que nos muestra la diferencia entre la difracción en altas y bajas frecuencias:

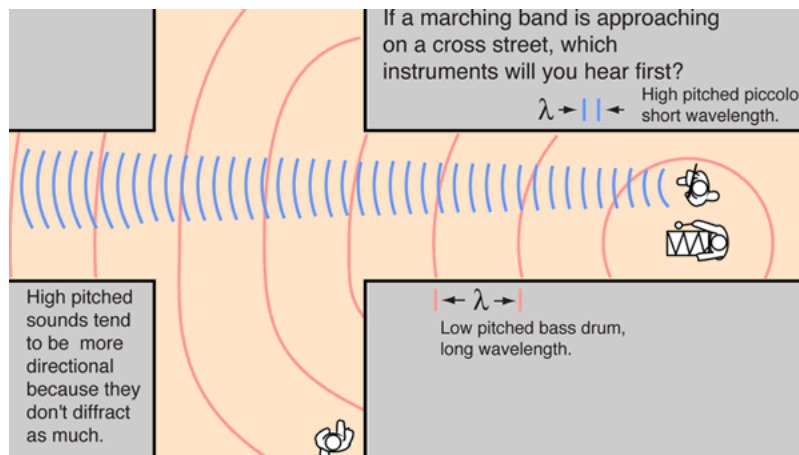


Ilustración 47

Podemos ver como la persona que va andando, escuchará mejor la señal de baja frecuencia que la de alta frecuencia.

Esta sección será importante en nuestro proyecto, ya que en la guitarra es uno de los fenómenos acústicos más importantes.

Importancia de los fenómenos acústicos en la guitarra

Estos fenómenos acústicos intervienen directamente en el sonido que emite una guitarra. Debemos tener en cuenta que nuestro oído percibe el sonido de la guitarra principalmente gracias a la caja de resonancia. La cuerda es simplemente un medio de transporte de esa energía entre nuestro dedo y la caja de resonancia. Una vez la energía se transmite a la caja, ahí ocurren todos estos fenómenos acústicos.

Para hacernos una idea, a continuación mostramos un esquema ya visto anteriormente para ver cómo se reparte la energía del sonido en una guitarra:

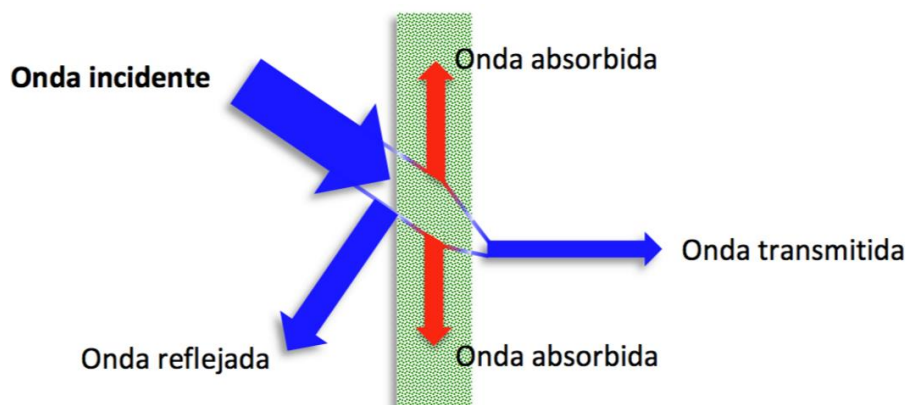


Ilustración 48

Podemos observar cómo la energía de la onda incidente se transforma en energía reflejada, energía absorbida por la madera y energía que se transmite al medio contiguo a la madera (exterior). A continuación explicaremos la importancia de estos fenómenos en nuestra guitarra.

Reflexión

Cuando un guitarrista pulsa una cuerda se produce una transmisión de energía entre el dedo y la cuerda. Esa energía que se entrega a la cuerda, se transferirá a la caja de resonancia mediante el puente, un punto de unión entre la cuerda y el puente. Esta energía que recibe el puente hará vibrar la tapa superior de la guitarra produciendo una perturbación del aire que hay a su alrededor (principalmente dentro de la guitarra). Debemos tener en cuenta que el sonido que escuchamos de un instrumento de cuerda como la guitarra, procede casi completamente del cuerpo o caja de resonancia del instrumento y no de la cuerda. Esto lo podemos demostrar con el área en contacto entre la cuerda o caja de resonancia y el aire:

- Área de la cuerda en contacto con el aire: $0,0024 \text{ m}^2$
- Área de la caja de resonancia en contacto con el aire: 0.36 m^2

Vemos que el área en contacto con el aire de la caja de resonancia es 150 veces mayor al de la cuerda. Esto nos da una idea de la importancia en el sonido de la cuerda y de la caja. La cuerda tiene muy baja capacidad de perturbar el aire.

Si nos pusiéramos en la hipotética situación de que la cuerda no transmitiera energía a la caja (coeficiente de reflexión $R=1$), escucharíamos un sonido muy débil durante un largo tiempo (directamente de la cuerda a nuestros oídos). De esta manera la caja no tendría ninguna importancia acústica.

En la situación de $R=0$, es decir, sin reflexión (toda la energía de la cuerda se transmite a la caja) escucharíamos un sonido muy fuerte, pero muy corto directamente desde la caja.

Ambos extremos son indeseables para la fabricación de una guitarra, así que el fabricante debe buscar un punto intermedio agradable para el oyente y optimizando el sonido de la guitarra.

Al pulsar la cuerda de la guitarra se producen simultáneamente dos ondas en la misma dirección pero sentidos opuestos, de valores $\xi \cdot (x-vt)$ y $\xi(x+vt)$. Estas ondas se irán reflejando desde el traste pulsado hasta al puente hasta que la energía vaya disminuyendo y la cuerda deje de vibrar. Este fenómeno se produce gracias a la transmisión de energía que hay entre la cuerda y la caja de resonancia.

El coeficiente de reflexión se define como la relación entre las amplitudes incidentes y reflejadas. Está relacionado directamente con el número de reflexiones que se producen en una onda de la siguiente manera:

$$\xi_r = R^N \cdot \xi_i$$

Siendo I la amplitud (r : reflejada, i : incidente) y N el número de reflexiones.

Absorción

Como ya sabemos, la madera de la que está constituida la guitarra, es un material poroso, y por tanto es un material que absorbe tanto energía como humedad. Existe un término muy significativo en este apartado, el de *damping* (amortiguamiento). El damping es debido a las pérdidas de energía que tenemos debidas a la radiación del sonido y del material (madera). El damping es una función directamente proporcional a la velocidad del sonido.

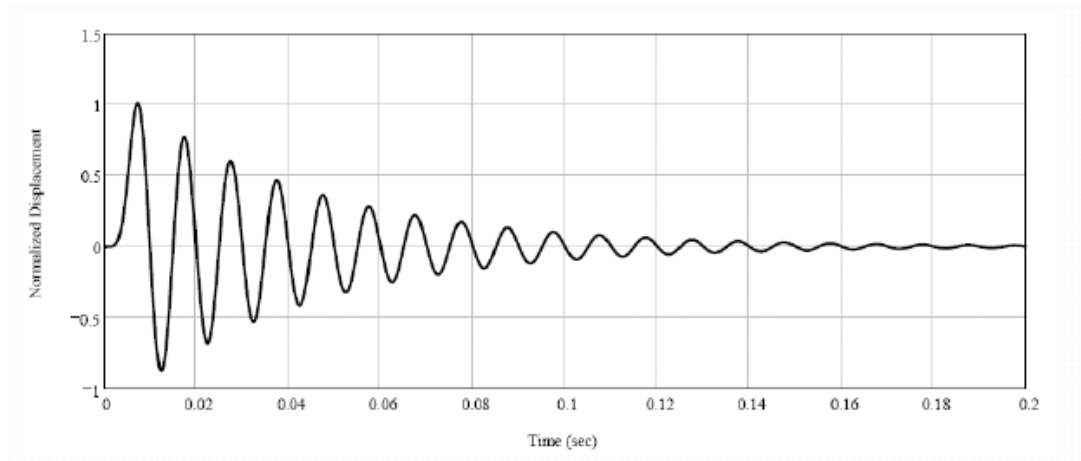


Ilustración 49

Como vemos en la imagen, el damping produce un amortiguamiento, un sustain del sonido hasta apagarse del todo.

Existen algunos modelos para explicar el efecto proporcional del damping. Por ejemplo el modelo de dos grados de libertad nos dan una idea de cómo se comportan la interacción material cuerda en el amortiguamiento del sonido.

Las dos masas representan los dos elementos que intervienen (cuerda y madera), donde k representa la rigidez y c el coeficiente de amortiguamiento (damping) [18].

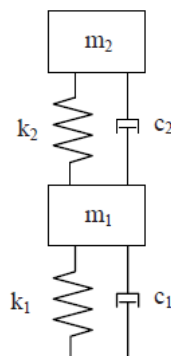


Ilustración 50

Difracción

La difracción es uno de los fenómenos acústicos más importantes en la guitarra. Como hemos dicho, cualquier sonido emitido por una guitarra no amplificada empieza con la energía cinética provocada por la oscilación de la cuerda. Una oscilación de 1 o 2 mm genera un sonido apropiado para la guitarra. Esa vibración es transmitida al puente y como consecuencia a la placa superior de la guitarra, que emite esa energía hacia su interior, reflejando las ondas y amplificándolas al salir por el agujero. De esta manera el agujero trabaja como una nueva fuente de sonido. La potencia de esta fuente de sonido depende de la frecuencia a la que sea expuesta.

La diferencia de la radiación de sonido entre altas y bajas frecuencias viene dado por el tamaño del radiador de sonido. El radiador puede ser una superficie que vibra o bien la boca de la guitarra. Esto es debido a que el comportamiento del sonido depende de la longitud de onda comparada con la dimensión del radiador. Si la longitud de onda es pequeña comparada con el radiador, el sonido viaja en una dirección concreta, rectilínea. Pero si la longitud de onda es grande comparada con el radiador, el sonido se dispersa en todas las direcciones de forma esférica. Si la longitud de onda es similar a la del radiador, la propagación será un punto intermedio entre unidireccional y esférica.

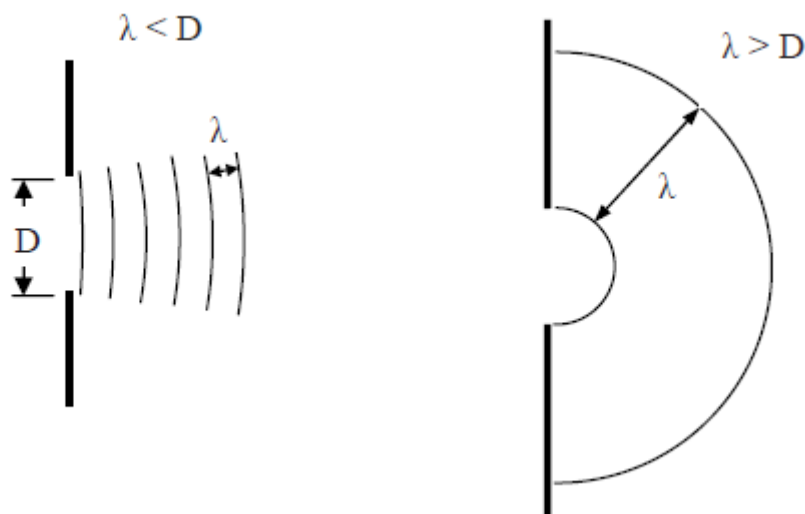
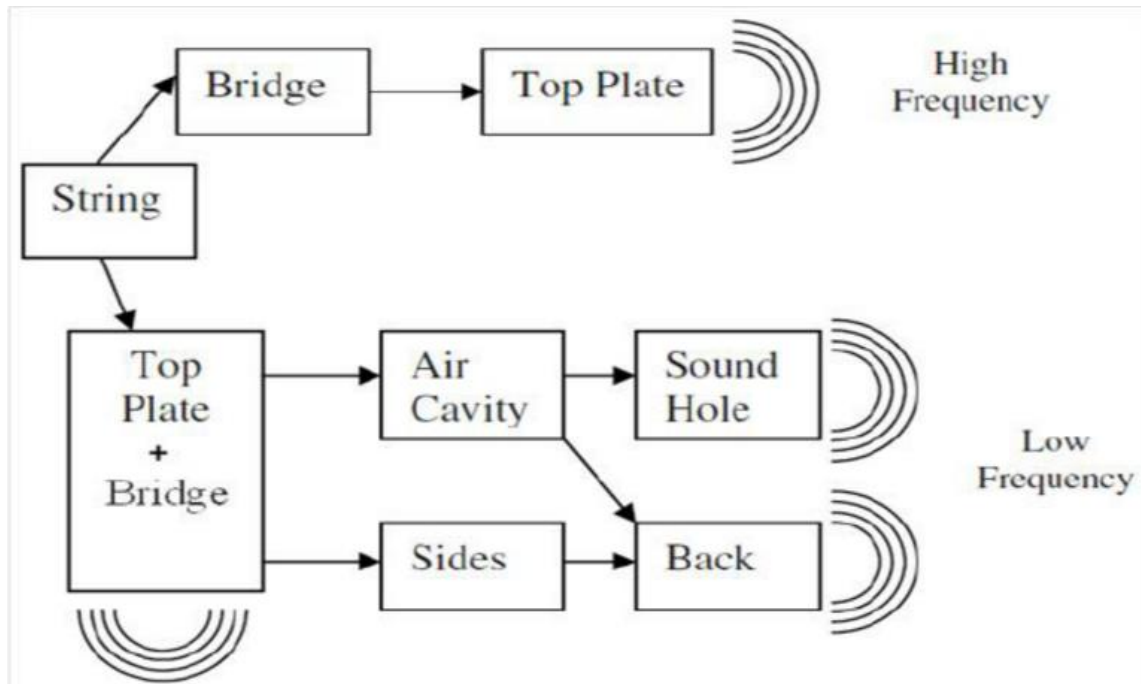


Ilustración 51

A continuación mostramos un esquema de cómo se comporta el flujo de energía en una guitarra [18]:



Il·lustració 52

La longitud de onda depende de la velocidad del sonido y de su frecuencia mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

La velocidad del sonido en el aire es aproximadamente 341 m/s. Entonces solo necesitamos conocer la frecuencia de un sonido para determinar su longitud de onda.

La frecuencia de un Mi de la última cuerda de una guitarra es $f=82,4$ Hz, por lo que su longitud de onda será 4,14 m. La frecuencia de un Mi de la primera cuerda en el 12 traste es 659 Hz, por lo que su longitud de onda será de 518 mm.

Conociendo la fórmula de la longitud de onda podemos calcular la frecuencia a partir de la cual consideramos altas o bajas frecuencias en la guitarra dependiendo del tamaño de la boca. El umbral que distingue altas o bajas frecuencias es aquel en el que la longitud de onda de dicha frecuencia coincida con la longitud de la boca de la guitarra.

El diámetro del agujero de una guitarra española estándar es aproximadamente de unos 88 cm. Conocemos la velocidad del sonido (341 m/s). Haciendo el cálculo:

$$\lambda = \frac{c}{f} \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{341 \left(\frac{m}{s} \right)}{0,88m} = 387,5 \text{ Hz}$$

Sabiendo que la frecuencia asociada a una longitud de onda de 88 cm es 387,5 Hz. Ahora debemos encontrar a qué nota corresponde:

Fret	String 6	String 5	String 4	String 3	String 2	String 1
nut	82.400	110.00	146.80	196.00	246.90	329.60
1	87.300	116.54	155.53	207.65	261.58	349.20
2	92.491	123.47	164.78	220.00	277.14	369.96
3	97.991	130.81	174.58	233.08	293.61	391.93
4	103.82	138.59	184.96	246.94	311.07	415.27
5	109.99	146.83	195.95	261.63	329.57	439.96
6	116.53	155.56	207.61	277.19	349.17	466.12
7	123.46	164.81	219.95	293.67	369.93	493.84
8	130.80	174.61	233.03	311.13	391.93	523.21
9	138.58	185.00	246.89	329.63	415.23	554.32
10	146.82	196.00	261.57	349.23	439.93	587.28
11	155.55	207.65	277.12	370.00	466.09	622.20
12	164.80	220.00	293.60	392.00	493.80	659.20
13	174.60	233.08	311.06	415.31	523.16	698.40
14	184.98	246.94	329.55	440.00	554.27	739.93
15	195.98	261.63	349.15	466.17	587.23	783.93
16	207.63	277.18	369.91	493.89	622.15	830.54
17	219.98	293.66	391.91	523.26	659.14	879.93
18	233.06	311.13	415.21	554.37	698.34	932.25
19	246.92	329.63	439.90	587.34	739.86	987.68
20	261.60	349.23	466.06	622.26	783.86	1046.4
21	277.16	369.99	493.77	659.26	830.47	1108.6
22	293.64	392.00	523.14	698.46	879.85	1174.6
23	311.10	415.30	554.24	740.00	932.17	1244.4
24	329.60	440.00	587.20	784.00	987.60	1318.4

Tabla 5

Esta tabla nos indica las frecuencias en una guitarra en función de la cuerda y del traste que pisemos. Observamos que nuestra frecuencia 387,5 Hz corresponde entre otras a la primera cuerda entre los trastes 2 y 3. Esta frecuencia no corresponde a una nota en concreto, sería una nota entre el Fa# y el Sol. Podemos comprobar mediante un experimento que la vibración de la placa vibrante de la guitarra es nula cuando tocamos notas superiores al Fa#, ya que en este caso la dirección de la onda es rectilínea.

Para comprobar éste fenómeno, realizaremos un ensayo haciendo un barrido de frecuencias y captando la vibración en un punto de la guitarra. Lo veremos en el apartado “*Ensayos Experimentales*”.

PARTES CONSTITUTIVAS DE LA GUITARRA

La guitarra se compone principalmente por tres elementos: la caja de resonancia, el mástil y la cabeza. Cada elemento estará compuesto por diferentes objetos, cada uno con una función específica.

Las partes estructurales de la guitarra son las siguientes:

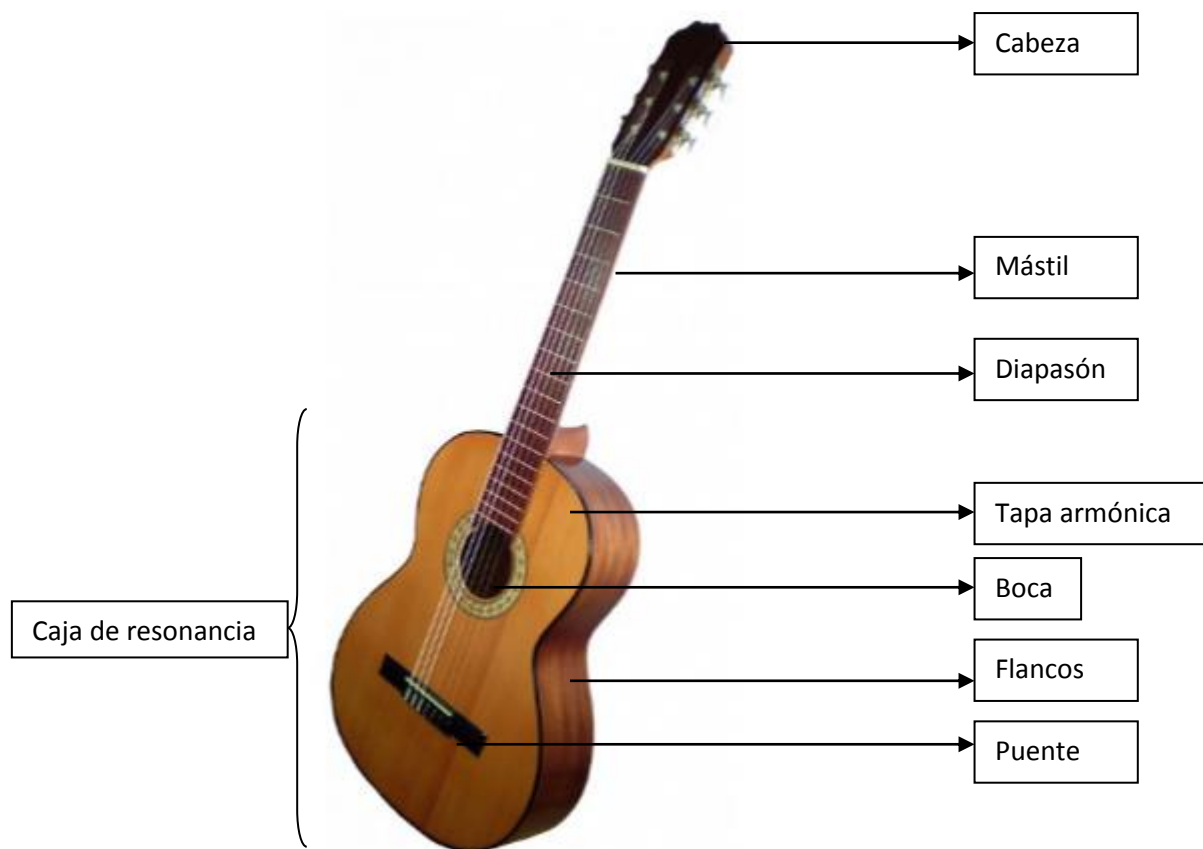


Ilustración 53

A parte tenemos otros elementos imprescindibles a la hora de emitir un sonido característico de la guitarra como por ejemplo las cuerdas, los clavijeros...

A continuación vamos a describir estos elementos y comentaremos la importancia que tienen en la guitarra.

Los elementos de una guitarra pueden tener dos funciones [25]:

- Estructural: Tienen función estructural todos aquellos elementos cuyo objetivo principal sea garantizar un correcto comportamiento estático y dinámico. Son aquellos

que resisten fuerzas y esfuerzos producidos por la tensión de las cuerdas o por la propia estructura de la guitarra.

- No estructural: Corresponde a todos aquellos elementos que tienen la función de emitir un sonido de calidad y característico de la propia guitarra. Todos estos elementos que tienen una función no estructural, están estudiados de tal manera que la emisión de ondas acústicas se realice de la manera adecuada.
- Mixtos: Existen algunos elementos que tienen ambas funcionalidades.

Caja de resonancia

La caja de resonancia es una de las partes más importantes en la guitarra. Tiene la función de amplificar el sonido emitido por la cuerda, haciendo resonar las ondas acústicas en su interior y dejándolas salir por el agujero.

Está formada por dos tapas exactamente iguales en cuanto a forma y por dos tiras de madera que siguen el contorno de las tapas, que se cierran por ambos extremos. Estos elementos generan un volumen de aire en su interior.

Las dos tapas se distinguen por el hecho de que la tapa superior (tapa armónica) tiene un agujero por donde salen las ondas acústicas y un puente en el cual se sujetan las cuerdas [26].

Cada elemento de la caja de resonancia tiene su propia función. A continuación explicaremos detalladamente cada parte de la caja de resonancia [26]:

Puente

El puente es el elemento que (junto a las cuerdas) une acústicamente el mástil y la caja de resonancia. La función del puente es completamente acústica.

Consiste en una pieza de madera adherida a la tapa armónica. Está situado a un tercio de la longitud total de la tapa armónica. La ubicación del puente depende de la longitud y posición del mástil. Se debe cumplir el requisito de que la longitud de las cuerdas (desde el puente hasta la cabeza del mástil) debe ser de 65 cm. Contra más largo sea el mástil más arriba (centrado) estará el puente [27].

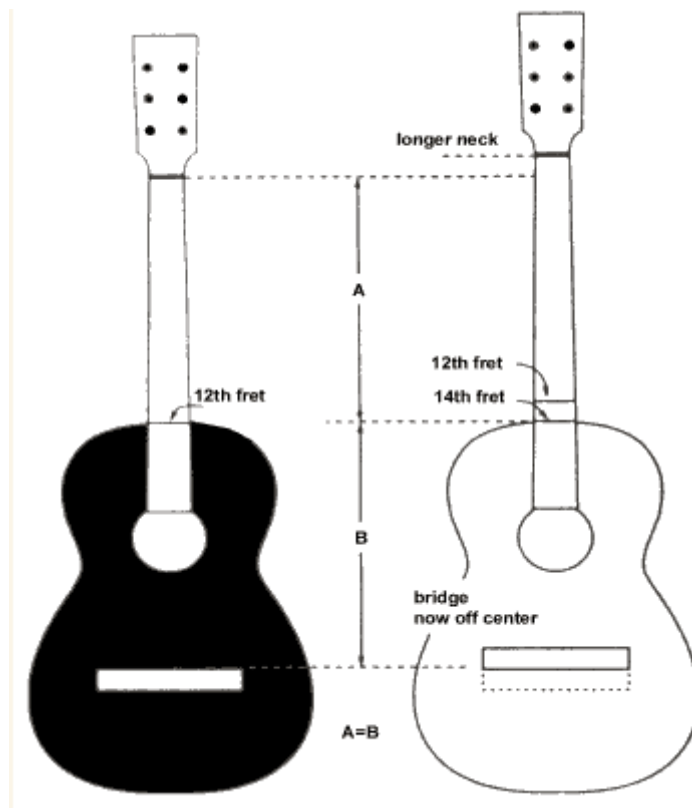


Ilustración 54

Su construcción depende del tipo de guitarra. Habitualmente es una pieza de madera que se adhiere a la tapa armónica con el objetivo de que se transmita toda la energía de las cuerdas hasta la tapa. Si la adhesión del puente absorbe demasiada energía su sonido no será el deseado, ya que la frecuencia de vibración de la tapa no coincidirá con la de la cuerda, por ello la adhesión debe ser buena, rígida y resistente.



Ilustración 55

El punto en contacto entre la cuerda y el puente es a lo que denominamos “montura”. Consiste en una pieza esbelta de marfil (muchas veces es de plástico sintético de alta densidad o hasta de metal) que posee un alto coeficiente de reflexión con el objetivo de que las ondas se transfieran de manera óptima a la tapa armónica.

El puente es el punto de máxima sollicitación mecánica de la guitarra, ya que es el que soporta toda la tensión de las cuerdas. Es por ello que se construye de manera aparte de la guitarra, para poder ser sustituido en caso de desgaste o grieta. Otro motivo es la complejidad de fabricar el puente y la tapa como un mismo elemento.



Ilustración 56

Una función del puente es mantener una adecuada altura de las cuerdas respecto del diapasón con el objetivo de tener cierta ergonomía a la hora de pisar una cuerda en el diapasón. La altura de la cuerda debe ser la idónea con tal de que no sea demasiada alta (dificulta pisar las cuerdas con rapidez, se requiere más fuerza en los dedos) ni demasiado baja (podría llegar el caso que la cuerda roce con algún traste y se produzca lo que conocemos como “ceceo”).

Estudiaremos de manera más detallada la sollicitación mecánica del puente en el apartado “Análisis de fuerzas y momentos”.

Muchos físicos han descubierto que la guitarra es un sistema de generación de sonido muy ineficiente. Se calcula que aproximadamente un 95% de la energía cinética generada se transfiere a vibraciones mecánicas y también se disipa en forma de calor y fricción. Sólo un 5% de la energía de vibración se convierte en sonido. Por este motivo es sumamente importante la calidad de la montura, ya que si se pierde algo de esta energía se obtendrá una pérdida desproporcionada en relación con el instrumento. También es muy importante el material del que está hecho con la finalidad de que tenga las mejores prestaciones para no absorber energía (no compresible, duro y rígido).

El puente tiene tres tipos de movimiento a la hora de vibrar [27]:

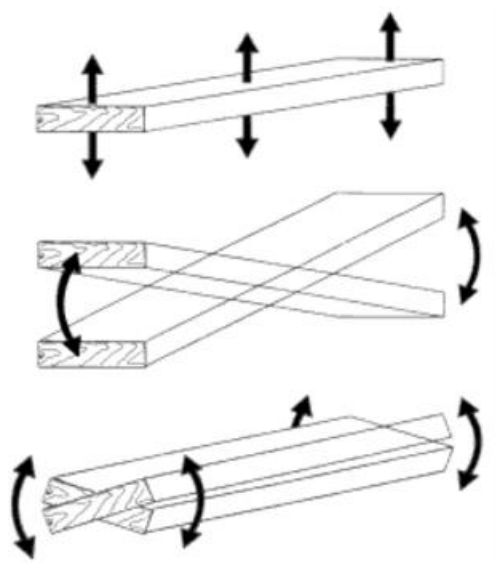


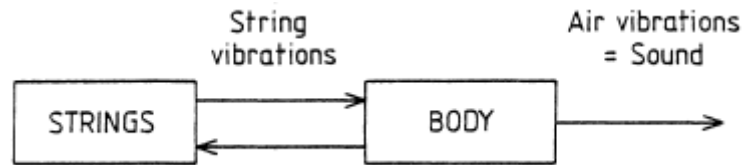
Ilustración 57

En la primera imagen vemos como el puente vibra como una sola pieza en la dirección vertical, en la segunda lo hace rotando respecto al eje situado en la mitad de la longitud del puente, y en el tercero vibra con un sentido torsional respecto al eje longitudinal. El tipo de vibración depende de las formas modales en la que vibre la tapa armónica. El primer modo de vibración se dará cuando el puente se encuentre en un punto de máxima amplitud (antinodo), el segundo ocurrirá cuando una línea nodal cruce el puente de manera transversal, y el tercer modo de vibración lo encontraremos cuando una línea nodal cruce el puente de manera longitudinal.

La vibración del puente y su modo de vibración generará deformaciones en la tapa armónica de la guitarra y transmitirá esas frecuencias propias a la que vibrará la tapa armónica solidariamente con el puente y la cuerda.

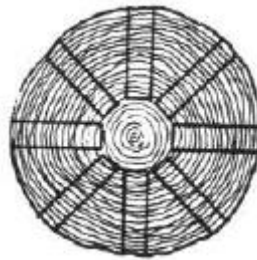
Tapa armónica

La tapa armónica es seguramente, la parte más importante de una guitarra a la hora de emitir un sonido. Como se ha comentado anteriormente, las cuerdas transmiten a la tapa armónica todas las vibraciones mediante el puente y obligan a hacer vibrar la tapa a la misma frecuencia que las cuerdas. El hecho de que la tapa vibre provoca que se mueva el aire contenido en la caja y amplifica esas ondas sonoras dejándolas salir por la boca. Ya hemos comentado en el apartado de “*Fenómenos acústicos – Difracción*” el fenómeno de la amplificación del sonido mediante la boca de la guitarra gracias al fenómeno de la difracción.



Il·lustració 58

El grosor de la tapa armònica oscila entre los 2,5 mm y los 4 mm. Está compuesta de dos mitades en el sentido longitudinal de la veta de la madera. El hecho de que se construya a partir de dos mitades es para asegurar la simetría de la geometría y de la distribución de vetas. Además tiene otro motivo, y es que de construirse de una sola pieza deberíamos partir de un tronco muy grueso. Las dos mitades se obtienen de cortar un tronco en el sentido longitudinal para asegurar una correcta distribución de las vetas [26].



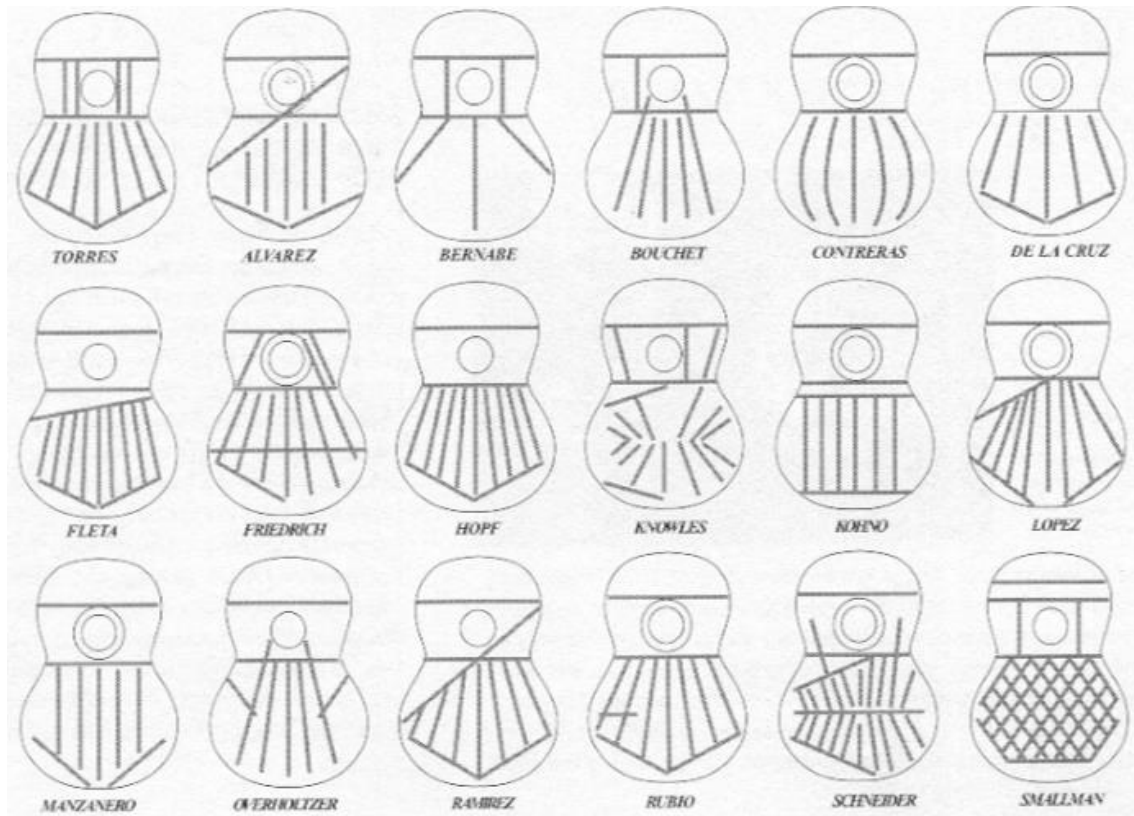
Il·lustració 59

La tapa armònica suele estar construida de madera de pinabete, ya que es la madera que mejores prestaciones tiene respecto a la relación densidad-rigidez. El sentido de las vetas es muy importante, ya que ofrecen una distinta resistencia a la velocidad del sonido. En el sentido longitudinal de las vetas la velocidad del sonido es de unos 3.600 m/s, mientras que en el sentido transversal es de 800 m/s, más de cuatro veces inferior. Por este hecho, también es importante que las vetas sean muy estrechas.

Por la parte interior de la tapa armònica encontramos una disposición de varillas de madera. Debemos distinguir entre dos clases de varillas:

- Varillas transversales: Su función es estructural para proporcionar resistencia a la caja y tapa armònica.
- Varillas longitudinales (sentido de la veta): Tienen como objetivo aumentar la masa de la tapa para conseguir que la tapa entre en resonancia con las frecuencias que emitirán las cuerdas al vibrar.

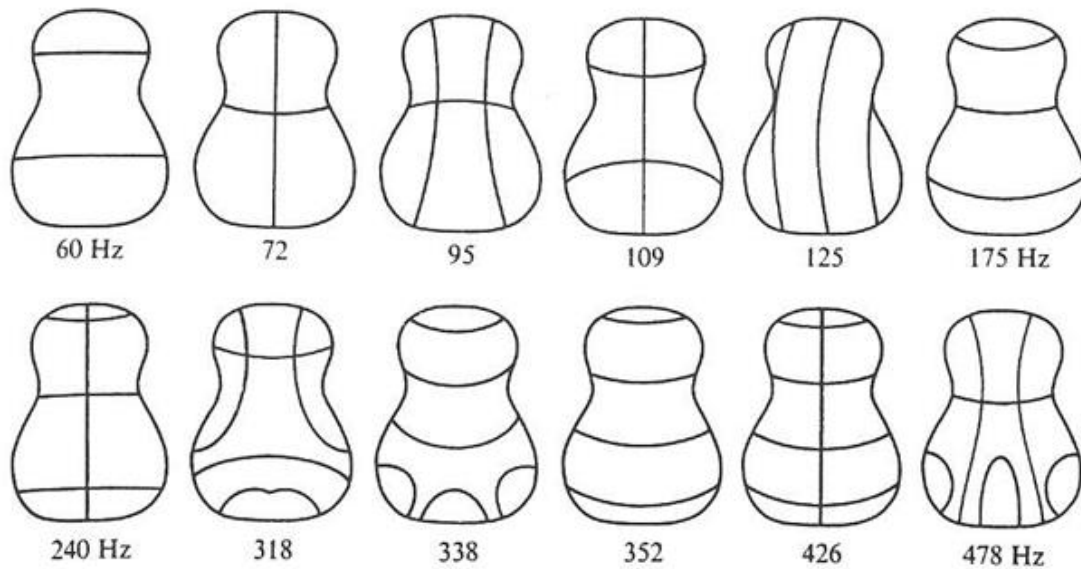
Existen muchas distribuciones de varillas, cada constructor puede disponerlas de manera personalizada, pero existen algunos patrones [26]:



Il·lustració 60

La primera distribució de varilles de la imatge, és la més usada. És la que se'n va inventar Antonio Torres (un dels pioners en construcció de guitarres, no el més) i es manté en l'actualitat degut al seu comportament.

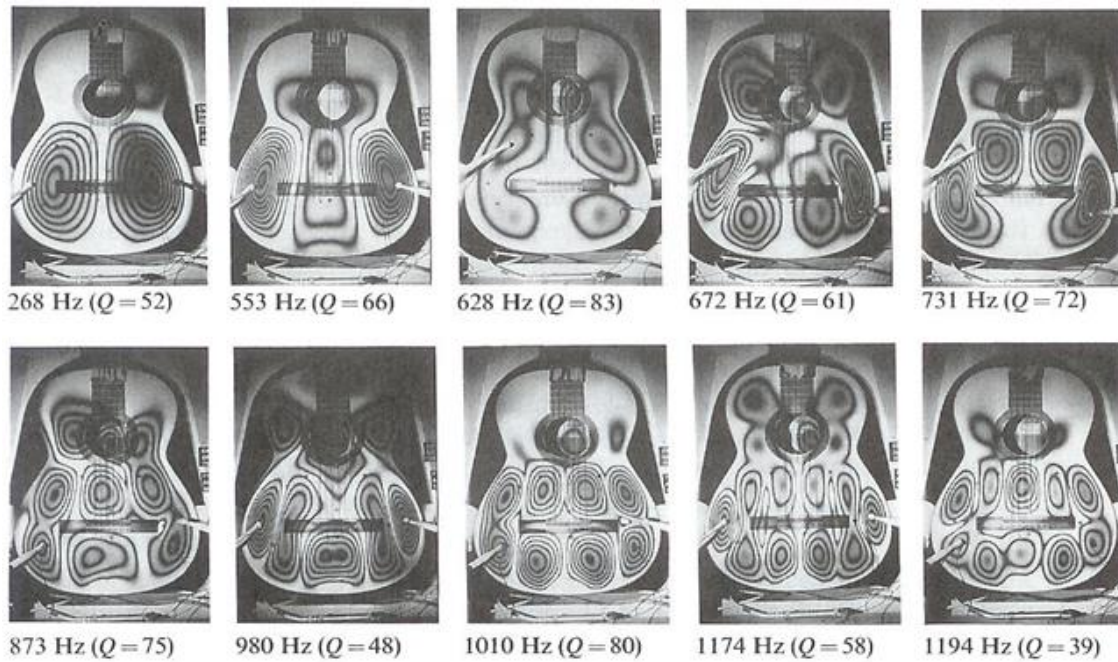
La distribució de varilles està relacionada amb la ubicació de les línies nodals que es formen a la tapa harmònica a algunes freqüències típiques [28].



Il·lustració 61

La mayoría de luthiers y constructores de guitarra han investigado mucho acerca de la distribución de barras armónicas, buscando una mejor calidad del sonido o mejor respuesta dinámica. Después de indagar mucho acerca de este tema y constatarlo con físicos y con fabricantes, los físicos aseguran que tiene una mejor respuesta dinámica algunas distribuciones a cierta frecuencia, pero todos los fabricantes con los que he hablado acerca de este tema (Guitarres Camps, Estruch...) me han asegurado que después de constatarlo con expertos a la hora de decidir la calidad sonora de una guitarra, que no influye en nada. Se han hecho experimentos con la misma guitarra cambiando el envarillado y no han sido capaces de distinguir el sonido de una guitarra variando estas barras armónicas.

La tapa armónica es el objeto de estudio más usado a la hora de valorar la calidad de una guitarra. Actualmente los fabricantes optan por contratar una serie de expertos en la calidad sonora de una guitarra haciendo votaciones para clasificar las guitarras por su calidad sonora. Otra alternativa que usan físicos o expertos en acústica es una simulación de elementos finitos de la tapa armónica de la guitarra. Con la simulación FEM podemos observar los puntos de máximo desplazamiento (máxima amplitud) y los nodos o líneas nodales de la tapa armónica a ciertas frecuencias. Esta simulación se suele comparar con experimentos empíricos. Consisten en estimular la guitarra (o tapa armónica) mediante un aparato como puede ser un Saker y captar las vibraciones que producen en la guitarra. Un Shaker consiste en un cilindro accionado por una membrana que vibra a la frecuencia que nos interese. La captación de vibraciones puede medirse mediante un láser u otras alternativas. A continuación vemos algún ejemplo de las formas nodales de vibración de la tapa armónica de una guitarra cuando se estimula a ciertas frecuencias [18]:



Il·lustració 62

Más adelante hablaremos acerca de la repercusión que tiene la tapa armónica en la calidad del sonido, ya que es el objeto de este proyecto. Lo veremos en el apartado “*Calidad del sonido*”. También lo trabajaremos en los ensayos que hemos realizado en el laboratorio de la UPC Terrassa (LEAM).

Flancos

Los flancos (aros) son dos tiras de la misma madera que el fondo, que tienen la función de cerrar la caja de resonancia. Su anchura es de 8-11 mm y miden unos 80 cm de largo. No tiene influencia en la calidad sonora. Fue el principal avance de la guitarra respecto del laúd, ya que en el laúd el fondo y los flancos son una sola pieza y esto provoca una gran rigidez de la pieza. Al tener un segundo diafragma que vibra, genera más grados de libertad para poder vibrar y puede amplificar mucho más el sonido [26].



Ilustración 63

Fondo

El fondo de la guitarra tiene la misma forma que la tapa armónica. Su función es básicamente estructural, aunque también aporta en el hecho de amplificar las ondas y contener el volumen de aire. El hecho de que la tapa armónica, los flancos y el fondo sean piezas distintas, ayuda en el hecho de que el fondo vibre también (aunque no sea su función principal) y eso siempre nos aporta mejor calidad sonora y mejor amplificación.

El fondo, al igual que la tapa armónica, está formado por dos mitades exactamente iguales que nos garantizan cierta simetría y contiene unas varillas de madera adheridas por la parte interior, que nos garantizan un equilibrio estructural en nuestra guitarra cuando se encuentra en un régimen dinámico, aportando mucha rigidez. Depende del fabricante, podemos encontrar guitarras con 3 varillas transversales en el fondo o con 2. Siempre habrá varillas en la parte inferior de la guitarra, en el punto en el que la anchura es máxima y otra un poco por debajo de la altura de la boca. Algunos luthiers introducen una tercera varilla en la parte superior de la guitarra, en el punto en el que la anchura de la silueta superior de la guitarra es máxima.

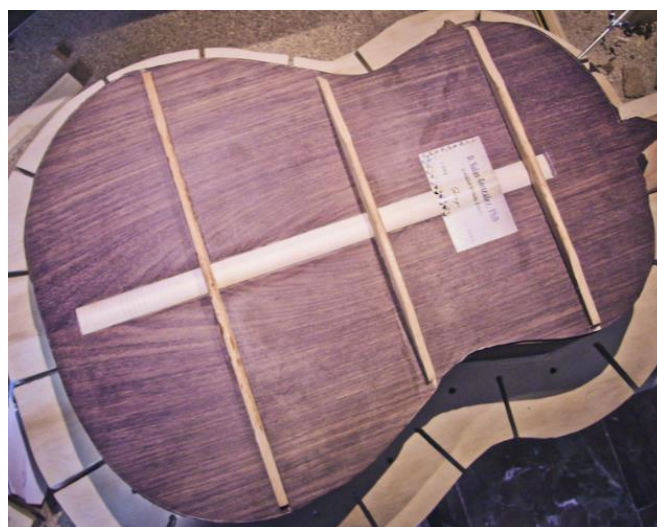


Ilustración 64

Habitualmente se usa madera de palo santo de Río de Janeiro o de la India para guitarras clásicas, y ciprés para las guitarras flamencas.

Mástil

El mástil de una guitarra es la parte que une la caja de resonancia y la cabeza con su clavijero. Consiste en una pieza de madera con gran esbeltez (larga y estrecha) en la que irá alojado el diapasón en la parte frontal.

Las solicitaciones mecánicas que va a sufrir son la tensión que producen las cuerdas. Es por eso que necesitamos una madera de gran estabilidad dimensional (que no sufra deformaciones), que pese poco (baja densidad) y que cumpla con la belleza que se le espera. La madera que mejor cumple con estas características es el cedro centroamericano. Necesitamos que sea resistente ya que la fuerza de las cuerdas puede provocar grandes deformaciones debido a la esbeltez del mástil. Por ese motivo se refuerza de dos maneras:

- Con un alma de aluminio: Todas las guitarras (eléctricas, acústicas y algunas clásicas y flamencas...) tienen una barra de metal que está insertada dentro del mástil y ayuda a ajustar la curvatura para compensar la tensión ejercida por las cuerdas. Gibson posee la patente del *truss rod*, aunque la idea procede del 1908 aproximadamente. El hecho de que encontremos un alma en el mástil provoca que tengamos dos tensiones, la de las cuerdas que tiende a curvar el mástil y disminuye la longitud y tensión de las cuerdas, y la del alma que nos ayuda a impedir que la tensión de las cuerdas genere deformaciones.
- Con un listón madera colocado en el sentido de la fibra de la madera con una inclinación perpendicular a la superficie del diapasón. De esta manera aumentamos su momento de inercia y nos garantiza la rectitud del mástil.

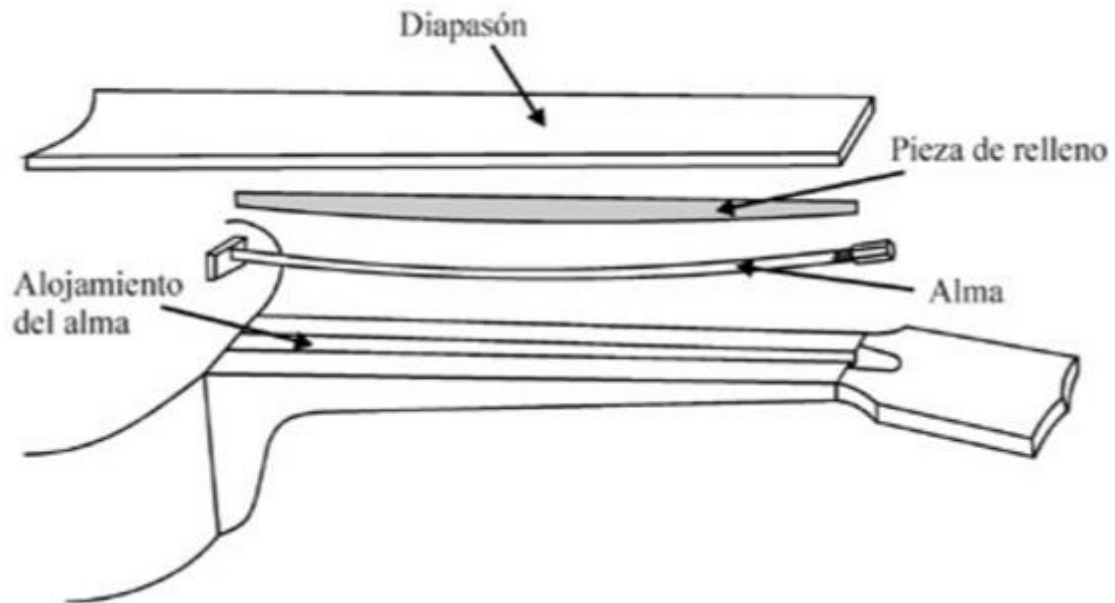


Ilustración 65

Existen muchas maneras de comprobar la rectitud del mástil. Una de ellas es pisar la sexta cuerda en el primer traste y en el último y la distancia de separación entre el traste medio y la cuerda debe ser de 0,2 mm. Si la separación es superior significa que tenemos el mástil cóncavo, y si es inferior o la cuerda toca con el traste medio significa que tenemos una ligera convexidad en el mástil [29].

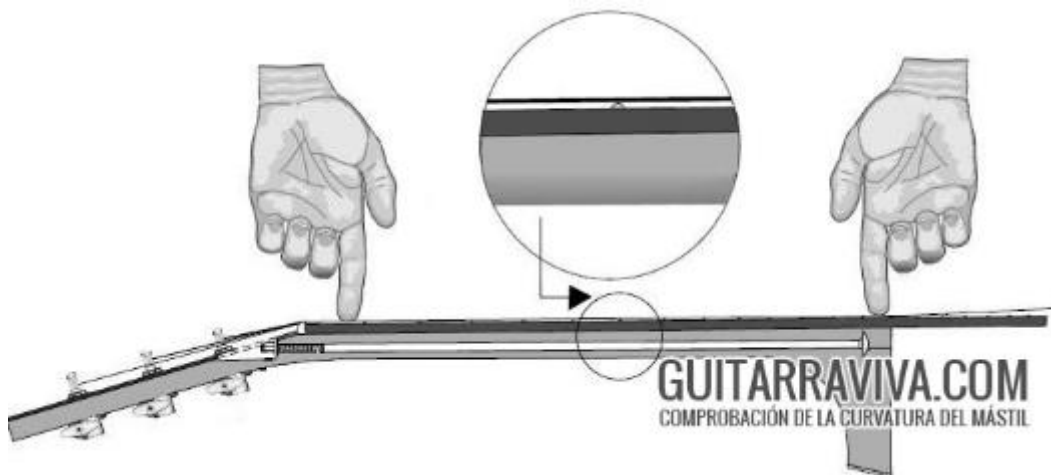


Ilustración 66

Las deformaciones del mástil pueden provocar que las prestaciones de la guitarra se vean muy perjudicadas por varios motivos, como un acortamiento de las cuerdas (se reduce la tensión), un desafinamiento permanente de la guitarra al no tener la misma distribución geométrica entre trastes, una mala calidad de sonido al no poder apoyar bien la cuerda sobre el traste, o una concavidad o convexidad del mástil entre otros.

Mástil cóncavo hundido



Il·lustració 67

Mástil convexo levantado



Il·lustració 68

En el caso de muchas guitarras clásicas o flamencas que no tienen alma, la tira de madera colocada en el mástil debe garantizar totalmente la rectitud del mástil.

En guitarras clásicas, flamencas y acústicas solemos encontrar el alma en el interior de la caja de la guitarra, justo al lado de la boca:



Il·lustració 69

En cambio, en guitarras eléctricas encontramos la cabeza del alma en la parte superior, junto al clavijero:



Ilustración 70

Diapasón

El diapasón es la pieza de madera estrecha y alargada que cubre la parte frontal del mástil. Es donde presionaremos las cuerdas a la hora de tocar. Es seguramente la parte más importante de la guitarra después de la caja de resonancia.

Las sollicitaciones mecánicas que requiere un traste es principalmente la dureza, ya que tanto el hecho de presionar la cuerda con los dedos sobre el diapasón y el roce constante de la cuerda, produce huellas que a medida que pasa el tiempo son cada vez más profundas. La madera que mejor cumple con estas características es el ébano de Guinea. Como la mayoría de árboles exóticos, el ébano de Guinea no tiene vetas [30].

Encontramos una gran diferencia entre los diapasones de las guitarras clásicas y flamencas, y las eléctricas y acústicas. Mientras el diapasón de una guitarra clásica o flamenca es prácticamente plano, el de una eléctrica o acústica tiene cierto radio de curvatura.

El diapasón está dividido por unas barras metálicas que llamamos trastes. Cada espacio entre barras corresponde a una nota de la escala musical.

Cálculo de la distribución de trastes en el diapasón

Al observar una guitarra, podemos observar que la distancia entre trastes en el diapasón no es constante. A medida que nos alejamos del clavijero, los trastes son cada vez más cortos. Concretamente corresponde a una relación exponencial. Esta distribución está intrínsecamente ligada a la relación entre frecuencias de la escala armónica. Las frecuencias correspondientes a la escala musical es la siguiente:

A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A2
440,00	466,16	493,88	523,25	554,37	587,33	622,25	659,26	698,46	739,99	783,99	830,61	880,00

Tabla 6

La principal relación que debemos observar es que la relación de frecuencias entre dos notas que forman una octava es el doble, es decir, la nota A tiene la mitad de frecuencia que la nota A una octava más agudo.

Podemos graficar la relación de frecuencias respecto de las notas:

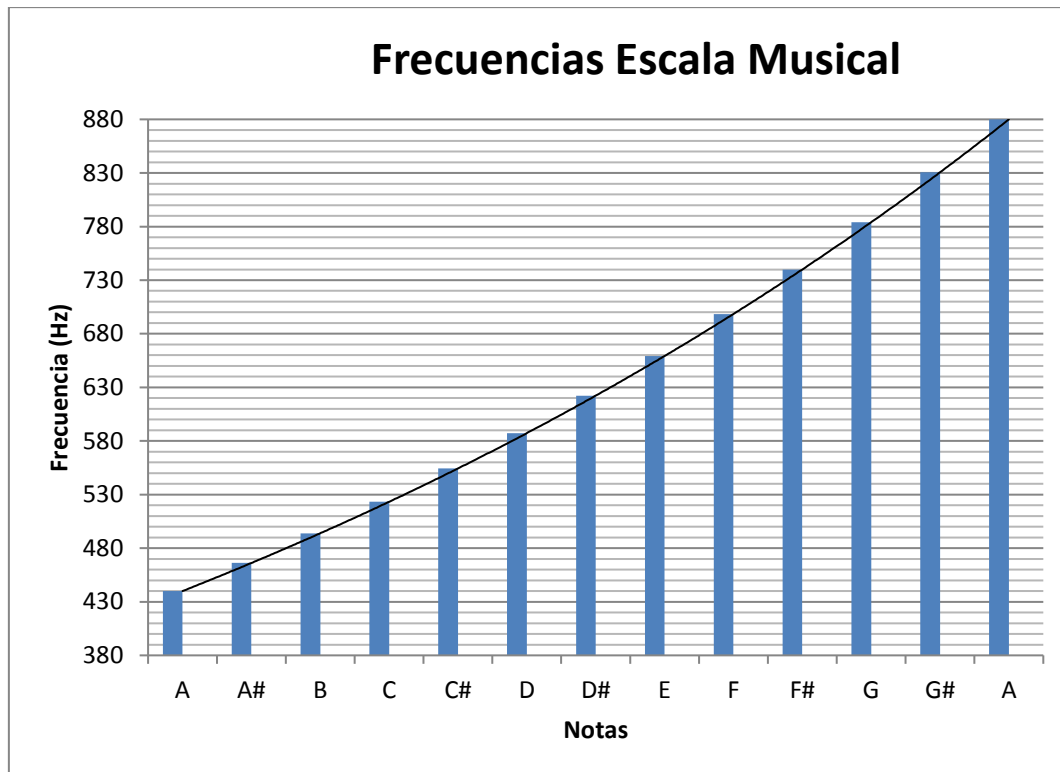


Ilustración 71

Observamos que tiene una tendencia claramente exponencial, y si hacemos una regresión exponencial nos da un factor de proporcionalidad entre notas de 1,059, es decir, la relación entre semitonos es siempre de 1,059.

Este factor de proporcionalidad es fácilmente calculable. Como hemos dicho antes, sabemos que la relación de frecuencias entre una octava es 2, por lo que [26]:

$$f_{12} = 2 \cdot f_0 \quad < 1 >$$

Sabemos que entre octavas existen 12 semitonos, y como corresponde a una relación exponencial, el factor de proporcionalidad corresponde con r^n , donde n es el número de semitonos entre dos frecuencias.

Volviendo a escribir la fórmula de forma exponencial:

$$f_{12} = r^n \cdot f_0 \quad < 2 >$$

Para n=12:

$$f_{12} = r^{12} \cdot f_0 \quad < 3 >$$

$$\frac{f_{12}}{f_0} = r^{12} \quad < 4 >$$

Igualando con la primera fórmula <1>:

$$2 = \frac{f_{12}}{f_0} = r^{12} \quad < 4 >$$

$$2 = r^{12} \Rightarrow r = \sqrt[12]{2} = 1.05946309 \quad < 5 >$$

Entonces acabamos de demostrar la relación de frecuencia entre dos semitonos. Antes de extrapolar de frecuencias a longitudes, debemos entender la relación que hay entre ellas:

Debemos partir de la ecuación de los nodos de una cuerda vibrante de longitud L:

$$\lambda = \frac{2 \cdot L}{n} \quad < 6 >$$

Ya que el primer nodo de una cuerda vibrante será aquel en el que la longitud de la cuerda sea media longitud de onda, entonces para el segundo nodo la longitud de la cuerda será la misma que la longitud de onda... Acústicamente, los nodos coinciden con los armónicos de cierta frecuencia.

Relacionando <6> con la ecuación de la frecuencia de una cuerda vibrante <7>

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad < 7 >$$

Nos queda:

$$f = v \cdot \frac{n}{2 \cdot L} \quad < 8 >$$

Finalmente, recordando la fórmula de la velocidad de propagación de una onda en una cuerda:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad < 9 >$$

Nos queda la ecuación completa de la frecuencia que genera una cuerda de densidad lineal μ , sometida a una tensión T y de longitud L :

$$f = \frac{n}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad < 10 >$$

Observando la fórmula <10>, nos damos cuenta que la frecuencia y la longitud de una cuerda vibrante es inversamente proporcional, es decir, un acortamiento de la mitad de una cuerda, genera un aumento del doble de la frecuencia a la que vibra:

$$\frac{f_1}{f_2} = \frac{L_1}{L_2} \quad < 11 >$$

Ahora podemos relacionar la longitud con la frecuencia. Volviendo al cálculo de la separación entre trastes en el diapasón de una guitarra, podemos saber la distancia exacta entre cada traste.

Si pulsamos la primera cuerda de una guitarra sonará la nota Mi (E 329,6 Hz) y para que suene la nota FA (un semitono más), que tendría una frecuencia de: $329,6 \cdot 1,059 = 349,2 \text{ Hz}$ debe haber una separación de "x" mm.

$$\frac{f_{Fa}}{f_{Mi}} = \frac{\frac{n}{2 \cdot (L - x)} \sqrt{\frac{T}{\mu}}}{\frac{n}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}} = 1,059^n \quad < 12 >$$

Tachando las constantes que se repiten nos queda:

$$1,059^n = r^n = \frac{L}{L - x} \quad < 13 >$$

Despejando x que es la variable que queremos encontrar (distancia entre trastes):

$$x = L - \left(\frac{L}{r^n}\right) = L \left(1 - \frac{1}{r^n}\right) \quad < 14 >$$

De esta manera podemos calcular la distancia entre la cejilla y cualquier traste, siendo L la longitud total de la cuerda (longitud entre la cejilla y el traste que suele ser 65 cm) y n el número de traste.

Por ejemplo, la distancia al primer traste es:

$$x = L \left(1 - \frac{1}{1,059^1}\right) = 650mm \cdot \left(1 - \frac{1}{1,059}\right) = 36,2 \text{ mm}$$

La longitud más característica es la de la octava, que obviamente corresponde con la mitad de la longitud de la onda, ya que es el primer armónico y la longitud de onda debe ser la misma que la longitud de la cuerda (fórmulas <6> y <8>).

Otra distancia muy característica es la que hay entre la cejilla y el traste 5. La guitarra está afinada por quintas, esto significa que la primera cuerda (Mi) tocada al aire debe tener la misma frecuencia que la segunda cuerda (Si) pulsando el traste 5. Solo hay una excepción, y es la que hay entre las cuerdas 2 y 3 (Si y Sol) que se afina por cuartas (2ª cuerda al aire tiene la misma frecuencia que 3ª en el 4º traste). Esto es debido a una correcta ergonomía a la hora de realizar acordes y a tener una relación de frecuencias entre cuerdas coherente con el sistema musical.

Podemos demostrar el efecto de la afinación por quintas. La frecuencia de la primera cuerda (Mi) hemos dicho que era de 329,6 Hz. Si calculamos la distancia que debe haber desde la cejilla hasta el 5º traste con tal de que produzcan la misma frecuencia:

$$x = 650mm \cdot \left(1 - \frac{1}{1,059^5}\right) = 161,98 \text{ mm}$$

Si subimos 5 medio tonos desde Si llegamos a Mi:

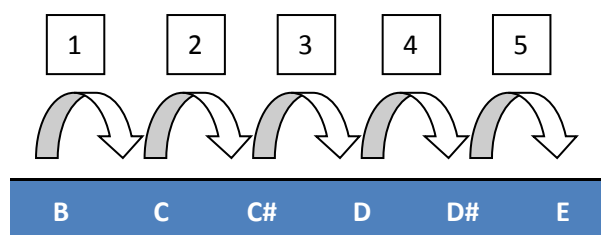


Tabla 7

Cabeza

La cabeza consiste en una pieza de cedro chapada de palisandro (normalmente) que va unida al mástil en la parte superior. Tiene cierta inclinación para asegurar que las cuerdas se apoyen en la cejilla del mástil definiendo así la longitud efectiva de la cuerda, y se va ensanchando hasta rematar el instrumento.

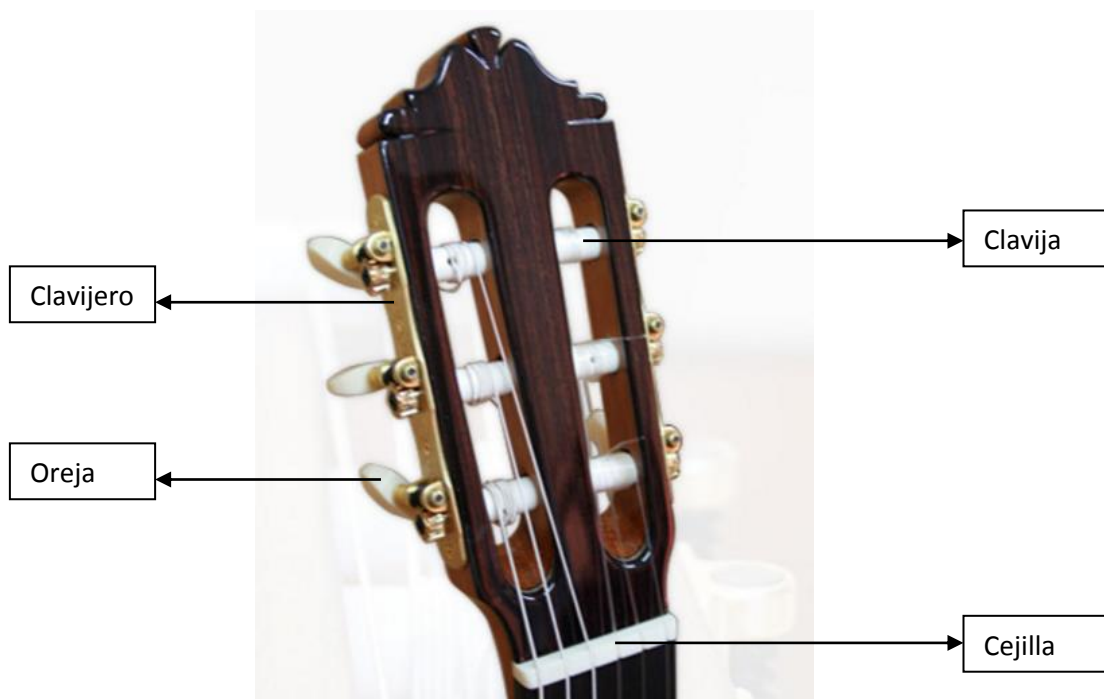


Ilustración 72

Su función es totalmente estructural, la calidad sonora de una guitarra no depende del clavijero. Soporta parte de la tensión de las cuerdas, ya que mucha parte la absorbe la cejilla en sentido perpendicular al diapasón, donde van apoyadas.

Contiene dos ranurados de unos 3,5 cm de ancho dispuestos simétricamente respecto el eje de simetría de la guitarra. La función de estas perforaciones es poder atar la cuerda a los clavijeros y tensarlas.

La terminación de la cabeza puede tener distintas formas, dependiendo del fabricante, en el que cada uno la personaliza a su manera y expone su sello propio.

Si hacemos una sección longitudinal de la cabeza encontramos 3 agujeros en cada lado de unos 10 mm de diámetro en el que introduciremos los clavijeros. Los clavijeros es el mecanismo que nos ayuda a afinar (tensar) las cuerdas de la guitarra. Consta de un sistema de tornillo sin fin-cremallera que al darle vueltas a la oreja la cuerda se va enrollando aumentando o disminuyendo su tensión [26].

Cuerdas

Las cuerdas de la guitarra son los elementos principales de la guitarra. En ellas empieza la generación y propagación del sonido. El estudio de las cuerdas no es el objeto de este trabajo, ya que podríamos hacer un trabajo entero hablando únicamente de las cuerdas, así que haremos un pequeño resumen.

La cuerda de una guitarra (o de cualquier otro instrumento de cuerda), es un elemento vibratorio que genera un sonido que puede variar dependiendo de la frecuencia, amplitud... Consisten en segmentos formados por un material flexible que permanecen en tensión al ser apoyados por dos puntos (cejilla apoyada, puente amarrado), que pueden vibrar libremente. Existen distintos tipos de cuerdas que pueden variar su grosor, el material del que están hechos y por tanto sus propiedades mecánicas...

En las guitarras clásicas y flamencas, las tres cuerdas más agudas son de nylon, mientras que las otras tres suelen tener el núcleo de nylon pero se le añade un recubrimiento de bronce para dotar de unas propiedades acústicas y dinámicas distintas. Suelen llamarse “bordonas”.

La vibración de una cuerda resulta la suma de una infinidad de vibraciones en que las frecuencias que suenan (armónicos) son múltiples de la frecuencia fundamental. La frecuencia a la que vibra una cuerda depende del material, de la tensión a la que está sometida y de su longitud. Contra más corta sea la cuerda más alta será la frecuencia (agudo) y viceversa. Existe una fórmula que nos relaciona la frecuencia con la longitud de la cuerda y las propiedades del material (densidad lineal):

$$f = \frac{n}{2 \cdot L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Como podemos observar, la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de la cuerda, y directamente proporcional a la tensión a la que está sometida [18].

Si nos centramos en las tensiones, en la guitarra clásica y flamenca, existen 5 tipos de cuerdas según la tensión a la que estarán sometidas cuando se afine correctamente, y son:

- SHT: Super Hard Tension
- HT: Hard Tension
- MHT: Middle Hard Tension
- LT: Low Tension
- SLT: Super Low Tension

Los valores de las tensiones en cada grupo suelen ser aproximadamente la misma, aunque dependiendo del fabricante pueden variar un poco según la densidad de la cuerda u otros aspectos. Éste es, un terreno muy ambiguo y cada fabricante usa una teoría distinta. Vamos a ver algunas de ellas:

D'Addario es un fabricante estadounidense que en 2004 publicó un folleto en el que usaba la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\mu}{386,4} \cdot (2Lf)^2$$

Siendo T la tensión en Libras, μ la densidad lineal de la cuerda (libras/pulgadas), L la longitud de la cuerda en pulgadas y f la frecuencia de vibración en Hz.

Con esta fórmula basta con conocer las frecuencias de afinación (siempre las mismas), la longitud de la cuerda y su densidad lineal (midiendo la cuerda y pesándola).

En 2006, publicaron en su página web un programa calculador de tensiones, “String Tension Pro” en el que introduces tu juego de cuerdas D'Addario con tu afinación y longitud y te calcula la tensión y calibre de la cuerda. Este programa usa la ecuación anterior y la siguiente [32]:

$$T = \mu\pi(dLf)^2$$

Más tarde, en 2013 apareció una tabla en la página web de Hannabach (otro fabricante) en el que podíamos ver una tabla que nos indicaba la tensión de las cuerdas dependiendo del tipo de tensión a la que estén sometidas:

String	SHT	HT	MHT	MT	LT	SLT	
E-1	7,8 kg	7,6 kg	7,5 kg	7,3 kg	7,2 kg	7,0 kg	The tension chart shows average tensions of Hannabach strings. More information can be found on www.hannabach.com for scale 65 cm/25.5"
B-2	6,6 kg	6,5 kg	6,4 kg	6,2 kg	6,1 kg	6,0 kg	
G-3	6,8 kg	6,7 kg	6,6 kg	6,5 kg	6,2 kg	6,0 kg	
D-4	8,0 kg	7,8 kg	7,5 kg	7,3 kg	6,7 kg	6,5 kg	
A-5	8,0 kg	7,7 kg	7,4 kg	7,2 kg	6,7 kg	6,6 kg	
E-6	8,0 kg	7,8 kg	7,5 kg	7,1 kg	6,8 kg	6,5 kg	

Tabla 8

Podemos observar que nos indica que estas tensiones son válidas si el tiro de la guitarra es de 65 cm y la afinación es la estándar.

Respecto al calibre (diámetro) de las cuerdas es otro tema muy importante que pocos guitarristas tienen en cuenta. Como hemos dicho, la frecuencia fundamental a la que vibra una cuerda depende de su longitud, densidad y tensión. Si aumentamos el calibre de una cuerda, obtendremos una cuerda más pesada. Al ser más pesada conlleva que necesite más fuerza para excitarla y hará que suene más grave, por tanto para lograr la misma nota necesitaremos más tensión. Esta variación de la masa y tensión afecta mucho al sonido y al tacto a la hora de tocar.

La densidad de la cuerda no es una variable que esté estandarizada o predeterminada, ya que según el proceso de fabricación, los tratamientos superficiales, los recubrimientos etc que el fabricante realice la densidad variará sensiblemente. La densidad se mide experimentalmente y en base a ello se deducen las tensiones y calibres. No existe una tabulación de densidades.

Para hacernos una idea de la densidad, a continuación mostramos una tabla con densidades lineales (medidas experimentalmente) de un juego de cuerdas de guitarra clásica “Knobloch Strings Actives Double Silver”:

Cuerda	Densidad lineal	
1º (Mi)	3,80E-04	kg/m
2º (B)	4,60E-04	kg/m
3º (G)	9,80E-04	kg/m
4º (D)	1,58E-03	kg/m
5º (A)	3,42E-03	kg/m
6º (Mi)	5,73E-03	kg/m

Tabla 9

En resumen, el mundo de las cuerdas de instrumentos es un terreno muy amplio en el que se puede indagar mucho y hacer distintos estudios y análisis pero en este trabajo es suficiente con dar una pincelada a los aspectos más importantes y que más influencia tienen en la sonoridad y dinámica de la guitarra, que es el objeto principal de este proyecto.

ANÁLISIS DE FUERZAS Y MOMENTOS

Todos los tipos de guitarra tienen algunos componentes en común que están sujetos al mismo tipo de cargas y fuerzas. Encontraremos dos tipos de sollicitaciones, estáticas y dinámicas.

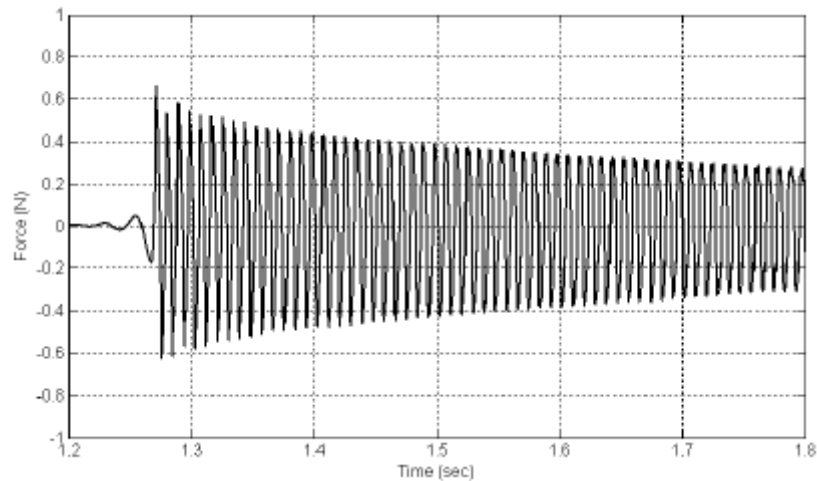
Las fuerzas estáticas a la que estará sometida nuestra guitarra son debidas a la tensión de las cuerdas que generan para estar correctamente afinadas, así que tanto la cejilla como el puente (y como consecuencia toda la tapa armónica) deben resistir éstos esfuerzos. Ésta tensión de afinación depende como hemos comentado anteriormente del calibre de la cuerda, a más diámetro, deberán resistir una tensión mayor. También depende del material y propiedades mecánicas de la cuerda, pues no es lo mismo una cuerda de acero (guitarra eléctrica) que una de nylon (guitarra clásica).

Además también encontraremos sollicitaciones dinámicas cuando el instrumento está sonando, pero estas obviamente serán de menos impacto en la guitarra que las estáticas, aunque también pueden ser la causa de una ruptura o grieta.



Ilustración 73

Para hacernos una idea las cargas estáticas de la guitarra oscilarán entre 30 y 50 kg dependiendo del tipo de tensión. Esto traducido a fuerzas sería entre 290 y 490 N. Las fuerzas dinámicas en cambio nunca excederán los 0,7 N de pico máximo, siempre dependiendo de la intensidad con la que se exciten las cuerdas. A continuación podemos observar la evolución temporal de la fuerza cuando excitamos la 6ª cuerda de una guitarra clásica (Nylon), que corresponde a un Mi de frecuencia de 40 Hz [18]:



Il·lustració 74

Por tanto las cargas dinámicas no son tan agresivas como las estáticas ya que no llega a ser un 0,2% de la sollicitación estática.

Otro tipo de sollicitaciones que no son tan obvias son debidas a cambios de temperatura y humedad. Son una fuente común de fallos estructurales. El efecto de la temperatura viene dado por la siguiente expresión:

$$\Delta L = \alpha L \Delta t$$

Donde L corresponde a longitud, t a temperatura y α al coeficiente de dilatación. Podemos relacionar el incremento de longitud con el incremento de tensión de la siguiente manera:

$$\Delta L = \frac{\Delta F L}{AE} \Rightarrow \Delta F = \frac{\Delta L A E}{L} = \alpha \Delta T A E$$

Cálculo de fuerzas

Como hemos comentado, las fuerzas más intensas que resiste la guitarra es la de la tensión de las cuerdas. Para conocer el valor aproximado que nuestro puente está resistiendo, primero debemos conocer estas tensiones y ver cómo afecta en el cuerpo de nuestra guitarra.

Hemos comentado en un apartado anterior que la tensión a la que se ajustan las cuerdas depende del calibre y como consecuencia del tipo de tensión de la cuerda. Recordemos que tenemos cinco tipos de tensión de cuerdas desde las de tensión más baja a las de tensión más alta. Si nos vamos a los extremos, *Super Hard Tension* (SHT) y *Super Low Tension* (SLT) tenemos las siguientes tensiones:

Cuerda	SHT Tensión (kg)	SLT Tensión (kg)
1ª (Mi)	7,81	6,71
2ª (B)	6,61	5,08
3ª (G)	6,85	5,31
4ª (D)	8,05	6,71
5ª (A)	8,15	5,67
6ª (Mi)	8,2	5,99
TOTAL	45,67	35,47

Tabla 10

Para explicar el ensayo que determine las tensiones a las que se afina una guitarra acudimos al libro de *“José Villar Rodríguez – La guitarra española, características y construcción”*, donde lo explica perfectamente.

Usa un juego de cuerdas de la mejor calidad y se tensan durante 30 días hasta conseguir una estabilidad en la afinación. El ensayo se hace mediante el siguiente esquema de montaje [26]:

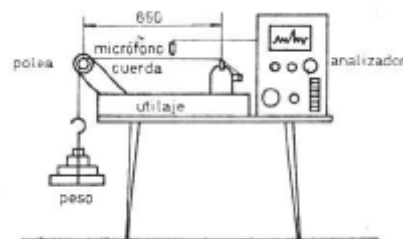
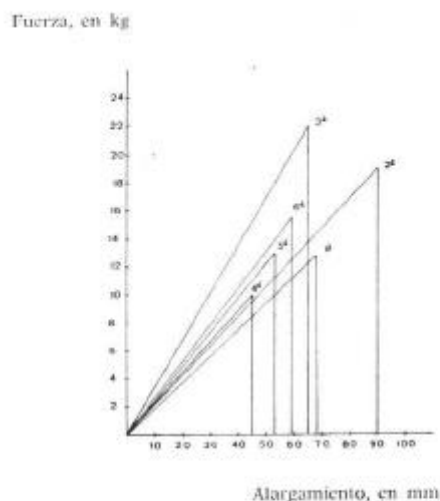


Ilustración 75

El ensayo consta de dos partes, ver la tensión correspondiente a la afinación de la guitarra y ver la tensión de ruptura de la cuerda, para poder calcular el factor de seguridad, que determina la vida útil de las cuerdas. Los resultados son los siguientes:



Cuerda número	Diáme- tro, mm	Tensión de afinado, kg	Tensión de rotura, kg	Coeficien- te de seguridad	Alargamientos Afinación, mm	Rotura, mm
1	0,70	7,325	12,8	1,75	36	68
2	0,80	6,275	19	3	31	90
3	1,05	6,325	22	3,48	18	65
4	0,75	7,125	10	1,40	32	45
5	0,95	7,125	13	1,82	29	53
6	1,11	7,125	15,5	2,18	27	59

Ilustración 76

Podemos observar como el coeficiente de seguridad como mínimo es de 1,40. Este coeficiente por supuesto variará a medida que pase el tiempo, ya que la cuerda se va a deformar (estirar) cada vez más, reduciendo éste coeficiente hasta la ruptura. El motivo de la ruptura pueden ser varios, máxima tensión que soporta debido a desgaste de la cuerda, entallas de la cuerda...

Éstas son las fuerzas que resistirá el puente, pero debemos tener en cuenta que el clavijero y la cejilla también resisten las mismas fuerzas de reacción para mantener el sistema en equilibrio. Para ello, pasaremos al siguiente apartado definiendo el diagrama de sólido libre en el que vemos todas las fuerzas que actúan sobre nuestro sistema, la guitarra.

Diagrama de sólido libre

Sabemos que las fuerzas que sufren las cuerdas son de tracción, y por consecuencia, nuestra guitarra sufre una sollicitación de compresión, en el que la cuerda tiende a juntar la cabeza y el puente. Ésta compresión es lineal en el tramo entre la cejilla y el puente, pero como la cabeza forma un ángulo con objeto de asegurar el perfecto apoyo entre la cuerda y la cejilla, encontraremos fuerzas con ángulos de inclinación que debemos tener en cuenta.

La primera fuerza que encontraremos es la de tensión de las cuerdas. Si hacemos una sección justo en la cejilla debemos encontrar la misma fuerza en un sentido que en el otro para que esté en equilibrio:



Ilustración 77

Donde T corresponde a la suma total de tensiones de las cuerdas de la que hemos hablado antes. También encontraremos momentos en los apoyos, ya que esa tensión aplicada a cierta distancia (distancia entre cuerda y diapasón o tapa armónica). Concretamente, el puente debe resistir una fuerza de tracción y un momento flector, ya que la tensión de las cuerdas tiende a levantar el puente por la parte inferior. El puente trabaja como si fuera un empotramiento, ya que resiste momentos y fuerzas en las 3 direcciones. En cambio, la cejilla actúa como si fuera una rótula deslizante, que solo se opone a fuerzas verticales. Será el clavijero quien nos resista las fuerzas horizontales y verticales y los momentos, ya que encontraremos la cuerda totalmente atada y tensada mediante la clavija.

Si nos centramos en el clavijero encontraremos fuerzas con ángulos de inclinación, es decir, la fuerza totalmente horizontal que nos crea la tensión de las cuerdas se descompone en una parte horizontal y en otra vertical.

A continuación podemos observar un esquema con todas las fuerzas y momentos que encontramos en el sistema [18]:

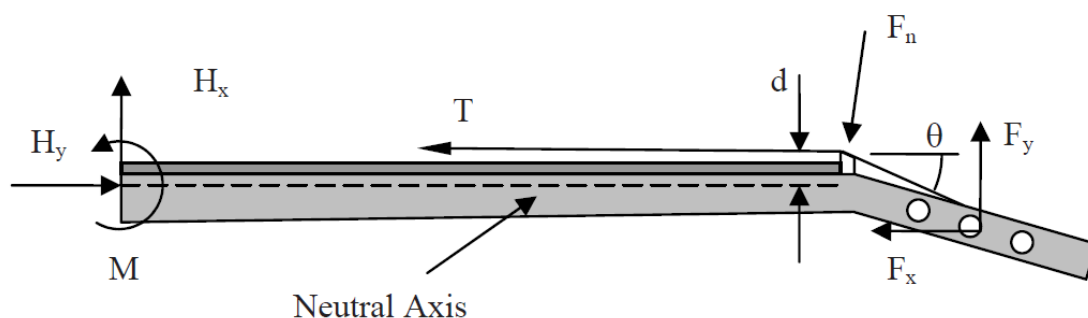


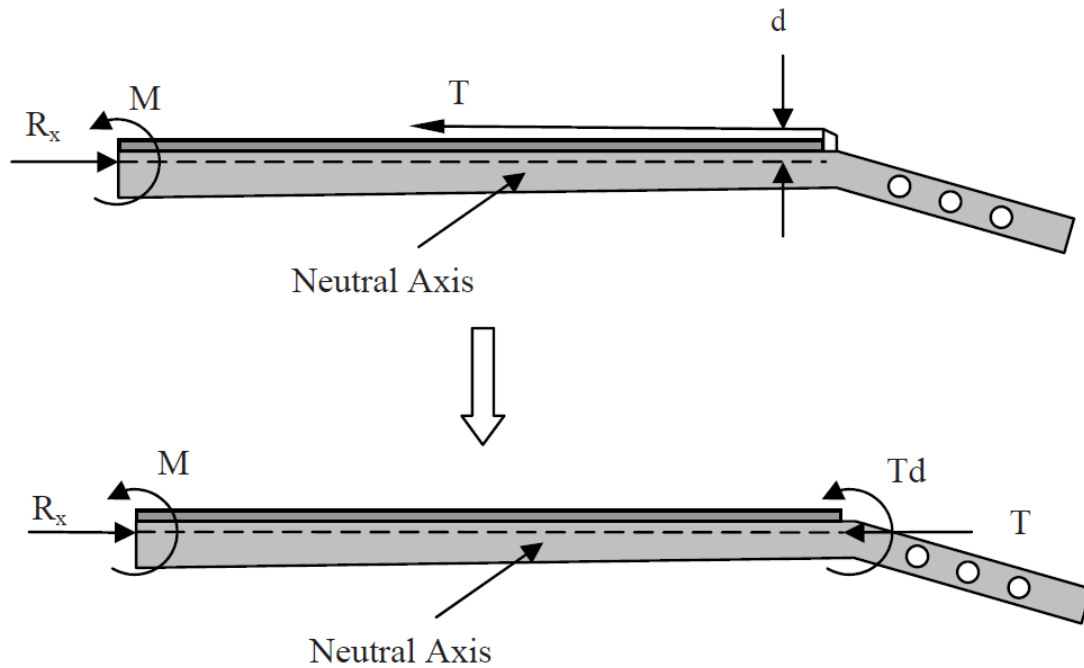
Ilustración 78

En él, podemos distinguir dos zonas. El puente (izquierda) y la cejilla (derecha).

- Puente: Encontramos las fuerzas resistentes propias de un empotramiento, una fuerza vertical (evita que el puente se despegue), otra horizontal (resiste la tensión horizontal de las cuerdas) y un momento que nos impide el giro del puente causado por la tensión y la distancia entre el punto de aplicación de la tensión y la base del puente.
- Cejilla: En la parte superior de la guitarra encontramos más fuerzas debido a que la cuerda está atada en el clavijero (con un ángulo de inclinación) y apoyada en la cejilla. Observamos que nos encontramos la tensión T de las cuerdas, separada una distancia " d " del eje neutral. Luego tenemos una F_n , que es la reacción del puente al apoyar una cuerda sometida a tensión, y finalmente las fuerzas F_x y F_y debidas a la descomposición de la tensión al crear un ángulo entre la dirección de la cuerda y el eje neutro. Realmente, también resiste un momento, pero es totalmente absorbido por el mecanismo tornillo sinfín-rueda del clavijero, así que no lo asume el propio cuerpo de la guitarra.

Obviamente los valores de las fuerzas para cada cuerda serán distintos, ya que en el clavijero, cada cuerda se ata a una distancia distinta y crea un ángulo distinto. Como nos podemos imaginar, el punto más crítico es el puente. En la cejilla y el clavijero la resistencia que oponen siempre será mucho más grande que la sollicitación a la que estén sometidas. En el puente también pero en menor medida, ya que las fuerzas ejercidas por las cuerdas nunca superarán la resistencia del puente y de la cabeza, ya que siempre romperán antes.

Finalmente, el diagrama de sólido libre (simplificado) de la guitarra sería el siguiente:

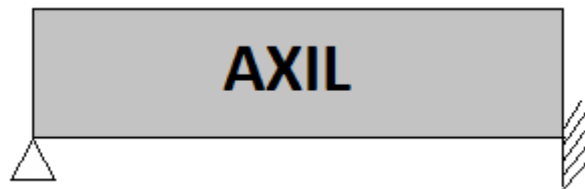


Il·lustració 79

Diagramas de esfuerzos y momentos

Los diagramas de esfuerzos y momentos que encontramos debidos a las fuerzas que hemos visto serían constantes, tanto el diagrama de momento flector como el de esfuerzo axial, y son muy simples de analizar.

El diagrama de esfuerzo axial es constante con valor del esfuerzo de tensión y de compresión.



Il·lustració 80

El diagrama de momento flector sería constante y con valor $M=T \cdot d$.

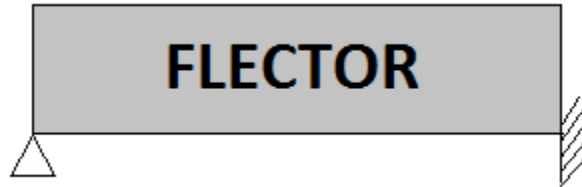


Ilustración 81

En lugar de analizar el tramo desde el puente a la cejilla, podemos analizar el que sufre la tapa armónica. Podemos estudiar la tapa armónica como una viga recta con dos rótulas fijas en los extremos. Lo analizamos en una dirección ya que sólo encontraremos fuerzas en el sentido longitudinal de la guitarra. La única fuerza que encontramos en toda la tapa armónica es la que ejerce el puente (provocado por las cuerdas). Conocemos ese valor de la tensión y la posición del puente respecto la tapa armónica ($L/2/5$ respecto de la parte inferior de la guitarra, la base).

Las fuerzas que encontramos serían las siguientes:

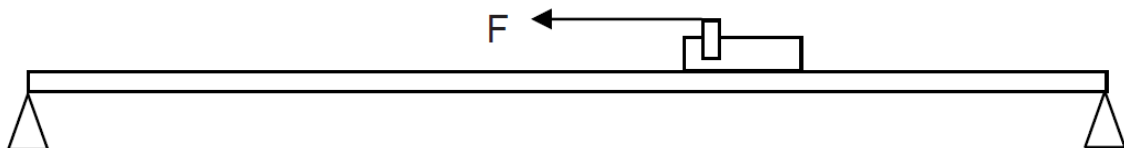


Ilustración 82

Y su diagrama de sólido libre:

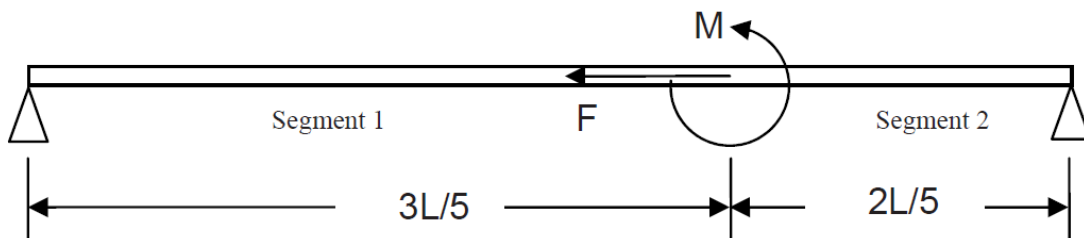
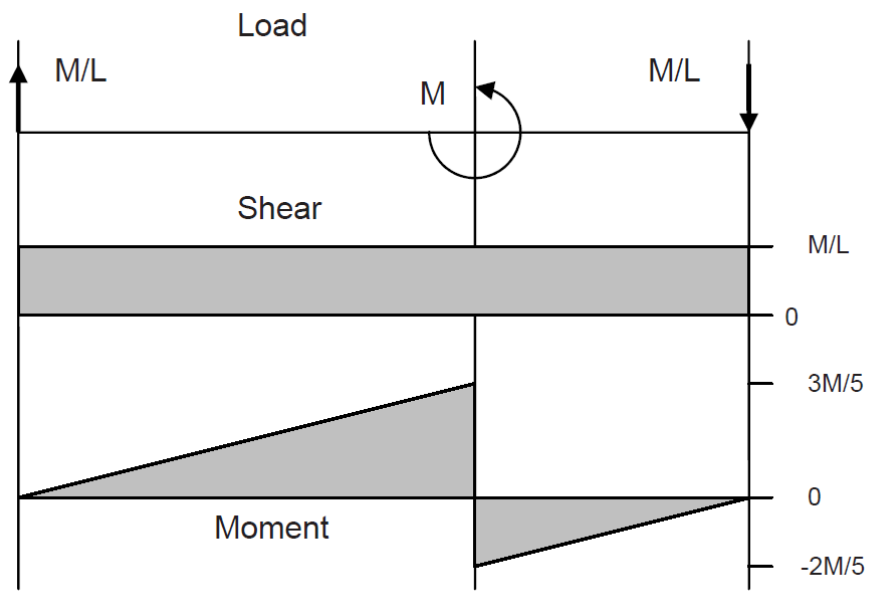


Ilustración 83

Como consecuencia, encontraríamos unos diagramas de esfuerzos y momentos un poco más complejos:



Il·lustració 84

CALIDAD DEL SONIDO

La calidad sonora de cualquier instrumento está caracterizada por su timbre y es una propiedad cualitativa. Por ese motivo cuando un equipo de expertos se dispone a clasificar o valorar la calidad sonora de distintas guitarras, la opinión de ese equipo raramente será unánime. Es por ello que se acude a una solución democrática, se numeran las guitarras a valorar, y cada miembro del equipo las valora subjetivamente y las clasifica de mejor a peor. Luego se hace un cómputo general y se clasifican definitivamente las guitarras. Ésta clasificación influirá mucho en su precio de venta, por ese motivo recae gran responsabilidad en el equipo de expertos y deben ser muy críticos a la hora de valorarla [33].

El principal problema es que la descripción de la calidad del sonido de un instrumento es universalmente imprecisa. Es común describir el sonido de una guitarra como brillante o apagado, suave o agresivo... Cuando intentamos usar términos descriptivos, tratamos de encontrar palabras cuyas connotaciones emocionales se relacionen con las propiedades del sonido. Ésta información ofrece muy poca información útil para el analista o diseñador.

Existen unos cánones a la hora de describir el sonido de una guitarra:

1. Identificar las propiedades del sonido relacionadas con un instrumento superior
2. Con la finalidad de acercarse a los principios físicos, debemos identificar las características del instrumentos que nos permiten producir un sonido superior
3. Por último debemos desarrollar procedimientos predictivos (no descriptivos) para incorpora ésta calidad sonora superior en un nuevo diseño del instrumento desde el inicio.

Al intentar desarrollar estos pasos, nos encontramos con tres problemas asociados con la calidad sonora:

1. Descripción de la calidad sonora basada en términos subjetivos
2. Correlación de la calidad sonora con los principios físicos.
3. Predicción de la calidad sonora desde un nuevo diseño.

Los luthiers más expertos, fabrican guitarras de muy alta calidad, y obviamente han resuelto éstos problemas empíricamente. Existe poca literatura que establezca una base firme para solucionar éstos problemas. El principal problema a la hora de determinar la calidad sonora de un instrumento, es que cada lutier ofrece conclusiones que no coinciden entre ellos. No existe una definición de buena calidad del sonido por la razón de que cada guitarrista prefiere calidades tonales distintas en sus guitarras. Al final, la música es un arte y la diversidad de opiniones y expresiones forma parte de ella.

No tenemos la seguridad e que una única combinación de características de diseño puede producir un tipo específico de sonido. Puede darse el caso de que muchas combinaciones distintas de ésas características (como la distribución de rigidez superior, geometría del cuero,

propiedades de la madera...) puedan dar lugar a un instrumento de calidad. Pequeñas variaciones de estas propiedades son tan sutiles que podemos no llegar a captarlas con aparatos de medición.

Para asegurar una mínima calidad de la guitarra, deben cumplir una serie de requisitos:

- En todas las cuerdas (bajo cualquier grado de tensión) se cumplirá que pisando el traste 12 se produzca la octava respecto al sonido de la cuerda al aire.
- Se deben poder ejecutar armónicos en los trastes 5, 7, 12 y 19.

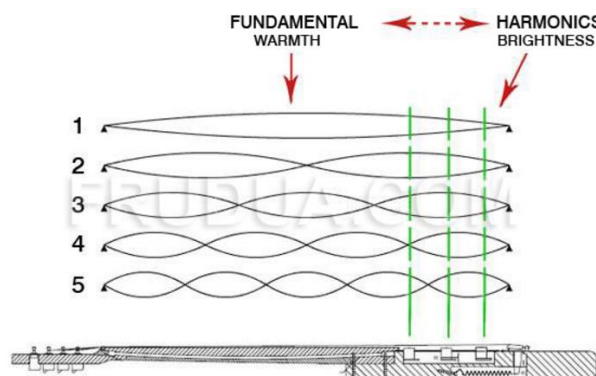


Ilustración 85

- El sonido debe ser limpio en todas las cuerdas y en todos los trastes, sin que se produzcan roces de las cuerdas con los trastes. Si ocurre, podemos acudir a la solución de alzar el hueso del puente.
- Los sonidos deben durar el mayor tiempo posible. Una guitarra en que el sonido se apague rápidamente, no puede ser de calidad. Esta propiedad va intrínsecamente ligada a la intensidad de sonido.

A parte de éstos requisitos, en el apartado de *Partes Constitutivas de la Guitarra*, explicamos la incidencia que tiene cada elemento de la guitarra en su calidad sonora. También influyen los fenómenos acústicos de los que ya hemos hablado.

Existe un acuerdo, sobre lo que nos puede llevar a detectar una mala calidad de sonido. Una serie de parámetros o representaciones nos dan unas directrices para valorar un instrumento bueno, pero para instrumentos de gran calidad es difícil encontrar distinciones.

Estos parámetros o representaciones son:

- Representación del dominio temporal
- Representación del dominio frecuencial
- Parámetros psicoacústicos
- Ratios subjetivos

A continuación explicaremos detalladamente cada uno de ellos [26].

Representación del dominio temporal

La representación temporal del sonido de una guitarra nos da información acerca de la intensidad, presión y/o potencia del sonido en cada instante de tiempo. En el eje horizontal siempre tendremos el tiempo y en el eje vertical la propiedad (usualmente relacionada con la intensidad) que queramos analizar.

En el apartado “*Conceptos básicos de la acústica*” explicamos que la envolvente que genera el sonido de una guitarra tiene las fases de ataque, decaída, sostenimiento y relajación. Estas cuatro fases las podemos ver claramente si ampliamos mucho la envolvente, pero a simple vista solo vemos dos fases, la de ataque y la de decaída.

A continuación vemos el primer segundo de la envolvente generada cuando pulsamos la cuerda de una guitarra (6ª cuerda al aire, un MI):

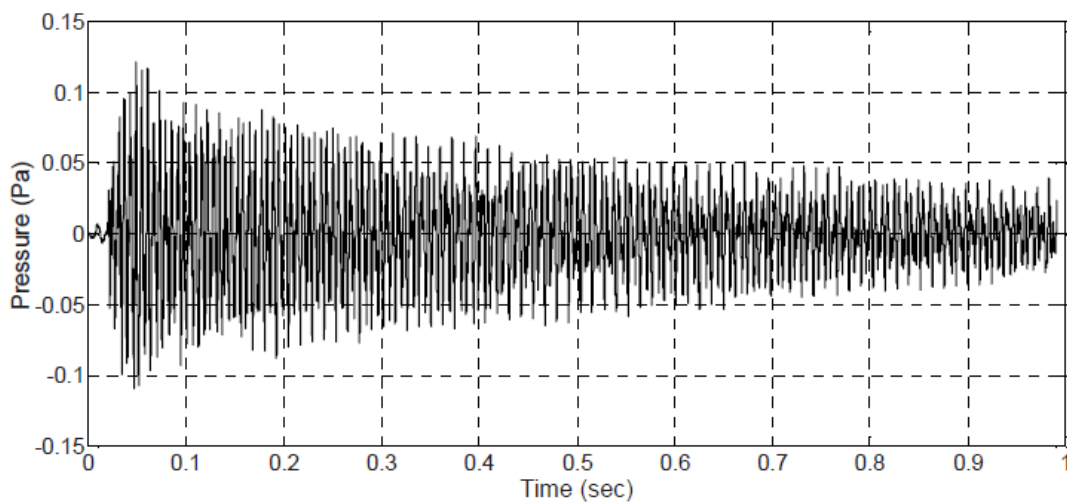
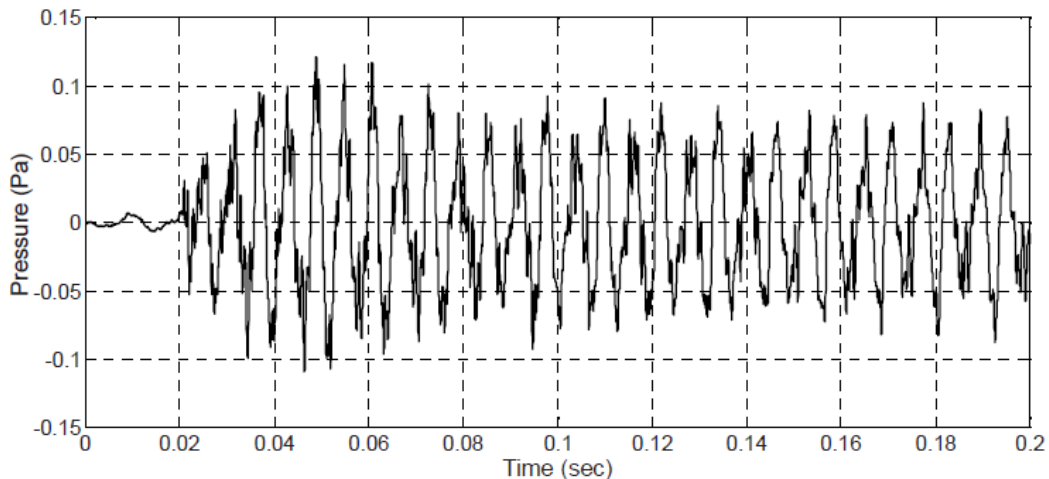


Ilustración 86

Observamos que la fase de ataque llega hasta aproximadamente los primeros 40 ms, y a partir de ahí la onda va decayendo hasta morir. Para ver mejor estas dos fases podemos mostrar el valor absoluto de la señal aplicando un filtro de paso bajo:



Il·lustració 87

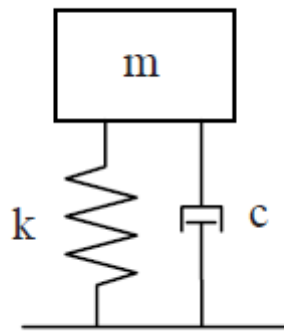
Se suele definir la fase de ataque de una onda sonora como el tiempo que tarda la señal para llegar desde el 10% al 90% del máximo valor. La fase de decaída la podemos definir al contrario, el tiempo que tarda la señal en pasar del 90% de su máximo valor al 10%.

En estas dos fases encontramos una relación directa con las sensaciones subjetivas que tenemos a la hora de valorar el sonido de un instrumento. La mayoría de guitarristas y expertos en audición están de acuerdo en que prefieren tiempos de ataque más largos, pues sonidos de guitarra con un tiempo de ataque muy corto suenan bastante brutos, agresivos, mientras que tiempos de ataque largos producen un sonido más cálido y suave.

Otro aspecto en el que están de acuerdo muchos expertos, es que prefieren sonidos de alta presión a frecuencias inferiores a 1 kHz, ya que el oído humano es mucho más sensible a partir de los 1000 Hz. Sonidos de alta intensidad implican tiempos de decaimiento menores, ya que la energía cinética de las cuerdas se convierte en radiación de sonido. Cuanto más alto sea el nivel de sonido, más energía se está convirtiendo y el movimiento de las cuerdas decaerá más rápidamente.

Los fenómenos de ataque y decaimiento del sonido están muy ligados con el damping (amortiguación). Definimos el concepto de damping como una medida adimensional que describe cómo las oscilaciones de un sistema decaen después de la estimulación. El ejemplo más claro es el de una masa suspendida por un muelle. Si excitamos la masa mediante una fuerza, ésta rebotará hacia arriba y hacia abajo. En cada ciclo, el sistema tenderá a volver a su posición de equilibrio pero lo supera con una cierta amortiguación. Este ciclo se repite hasta que la amortiguación mantiene el sistema en reposo.

Para explicar este fenómeno acudiremos al modelo matemático de un oscilador de un grado de libertad. Podemos esquematizarlo mediante una masa con un resorte rígido y un elemento amortiguador:



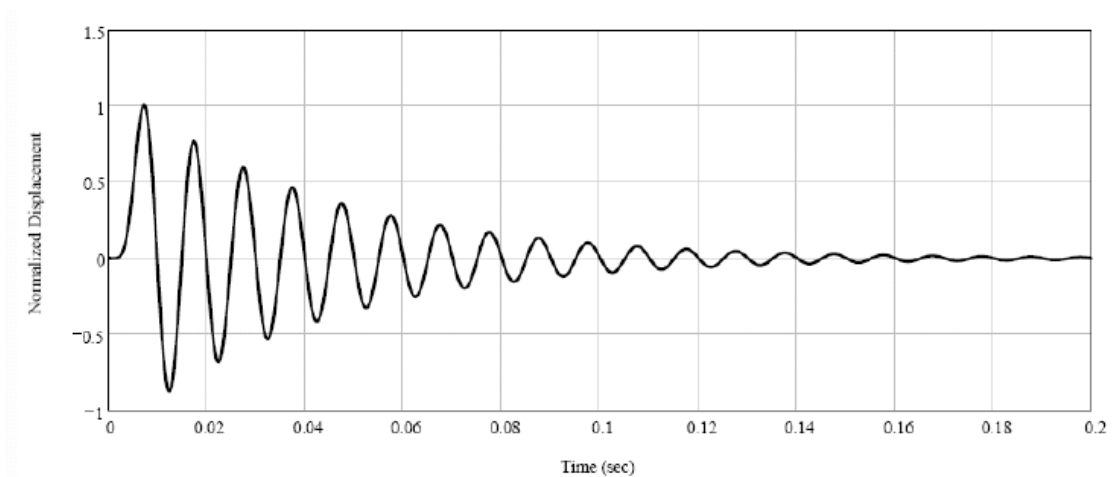
Il·lustració 88

La ecuación del movimiento del oscilador es:

$$f(t) = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx$$

Analizando la fórmula, vemos que la masa es proporcional a la aceleración (debido a la fuerza excitadora), el damping es proporcional a la velocidad y la rigidez al desplazamiento. Podemos considerar la rigidez como un muelle y el damping como un amortiguador.

La representació gràfica del efecte del damping en un sistema oscil·latori és la següent:



Il·lustració 89

La posició de la massa incrementa durant el primer 0.01 s, que és la duració de la força estimulante, i se asienta mitjançant una oscil·lació sinusoidal amb un decaïment exponencial.

En el cas de la guitarra, l'efecte del damping se deu a l'energia que es perd en dos fonts, el material i la radiació de so. La amortiguació del material produeix un

decaimiento exponencial, y la radiación acústica es una función directa de la velocidad del movimiento de la superficie (principalmente tapa armónica), entonces el amortiguamiento de la radiación lo podemos considerar proporcional a la velocidad.

Para esta situación no nos basta con un modelo de un grado de libertad, ya que no es aplicable a estructuras flexibles (como la tapa armónica y las cuerdas), necesitamos dos grados de libertad.

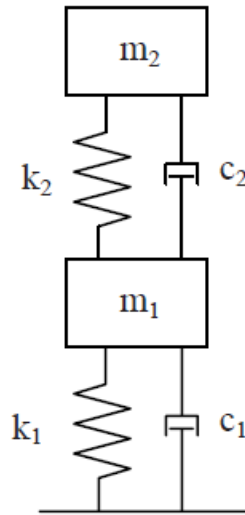
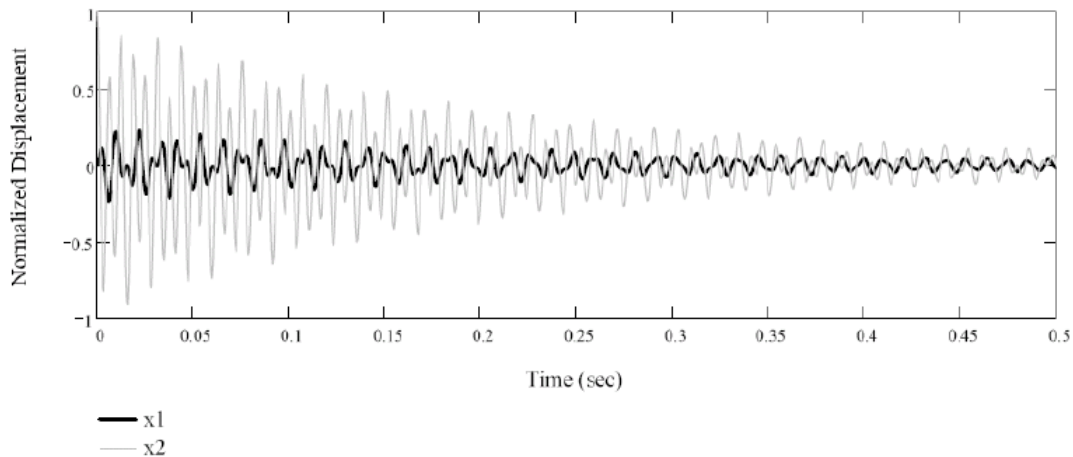


Ilustración 90

Este modelo, es demasiado simple para captar la física de una guitarra, pero nos muestra la interacción dinámica similar a la vista desde una cuerda montada en un cuerpo flexible.

Consideraremos que el subíndice 1 se refiere a la placa vibrante y el 2 a las cuerdas.

La rigidez y la masa de una cuerda son menores a la rigidez y la masa de la placa vibrante, por lo que se supone que m_1 es superior a m_2 , y como consecuencia k_1 es mayor que k_2 . Los valores se han ajustado de manera que la frecuencia de resonancia de la primera masa (sin efecto de la segunda) fuese de 100 Hz. La frecuencia de resonancia de la masa 2 (sin el efecto de la masa 1) se ajustó a 146,5 Hz (frecuencia de la 4ª cuerda de una guitarra, un RE). En cuanto al coeficiente de damping, se supone que c_1 es mayor que c_2 , ya que la placa vibrante de madera tiene más amortiguamiento de material y también experimenta amortiguación por radiación. Podemos observar en la siguiente imagen los comportamientos de las dos masas:



Il·lustració 91

Observamos que los dos sistemas tienen el mismo comportamiento temporal, tanto en el ataque como en la decaída. Esto nos muestra que el tiempo de ataque, que está relacionado con la calidad del sonido, puede ser explicado por las frecuencias naturales y los modos de vibración del instrumento.

Representación del dominio frecuencial

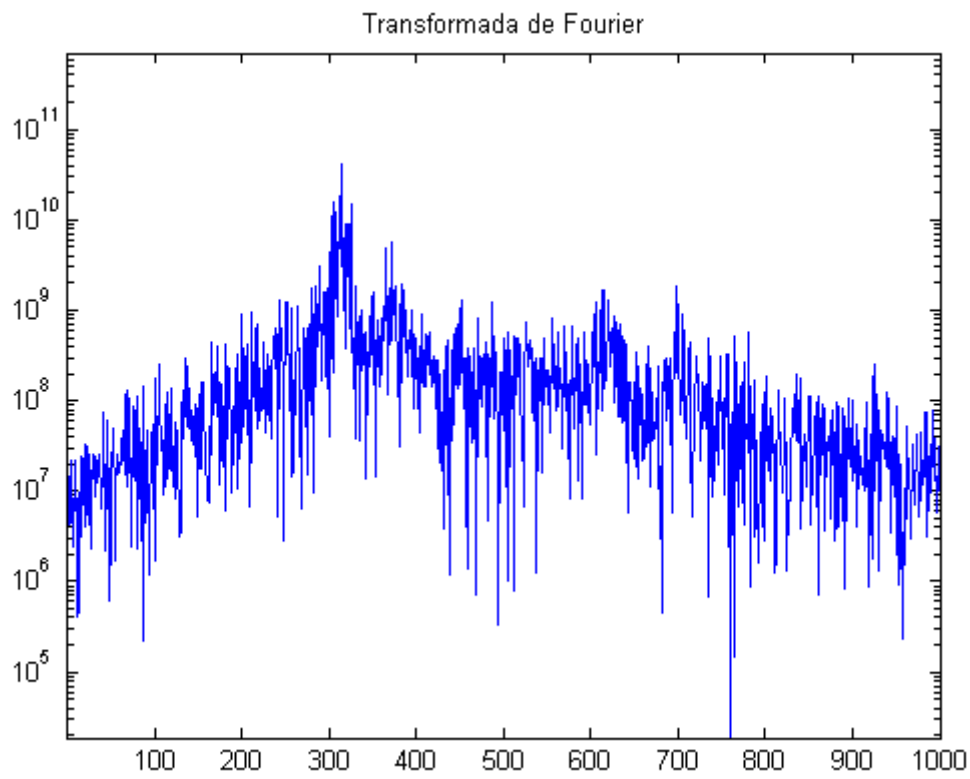
Otra manera de representar gráficamente una señal sonora, es mediante el dominio frecuencial. En ésta representación, en lugar de ver la amplitud de la señal en cada instante, vemos la amplitud que tiene cada frecuencia. Sustituimos el eje x de tiempo a frecuencia.

Para hacer esta transformación es necesario realizar una transformada de Fourier (FFT). La transformada de Fourier consiste en una transformación matemática empleada para transformar señales entre dominio del tiempo (o espacial) y el dominio de la frecuencia. Tiene muchas aplicaciones sobretodo en física e ingeniería. Es una transformada reversible y hace corresponder a una función f a una función g definida de la manera siguiente:

$$g(\xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-i\xi x} dx$$

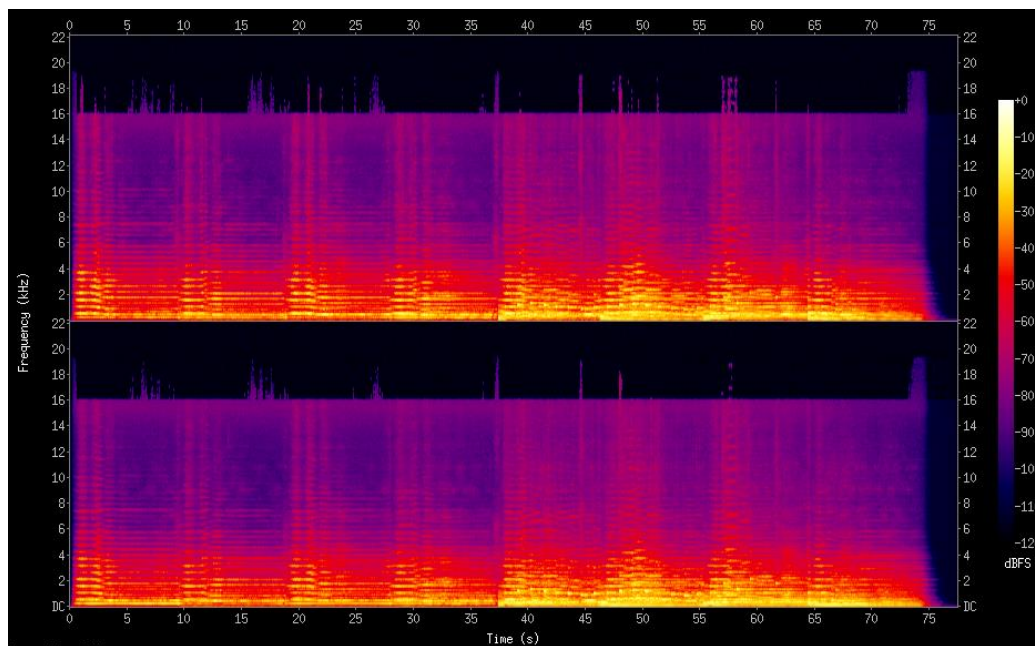
Esta representación frecuencial, es muy útil en el terreno de la acústica, ya que nos informa de las frecuencias y armónicos que posee un sonido. El tono y timbre de una guitarra está totalmente condicionado por las frecuencias que producen su sonido y sus magnitudes relativas. Podemos encontrar distintas representaciones frecuenciales. La más común es en el eje x la frecuencia y en el eje y la amplitud, pero también podemos encontrar representaciones en las que en el eje x encontramos el tiempo, y en el eje y la frecuencia. A estas representaciones se le denomina espectrograma. A continuación mostramos dos ejemplos:

Frecuencia-Amplitud:



Il·lustració 92

Espectrograma:



Il·lustració 93

Para determinar la calidad sonora de una guitarra nos es muy útil una representación frecuencial, ya que una representación temporal no nos da ninguna información acerca de la calidad del sonido. Un hecho que describe la calidad del sonido de guitarras clásicas está basado en el concepto de consonancia y disonancia. Se dice que dos sonidos (o más) son agradables para el oído humano cuando se trata de sonidos consonantes, mientras los que son desagradables se les denominan disonantes. La dificultad de describir este hecho, es como valorar un sonido consonante o disonante. Estas definiciones tocan con uno de los principales problemas de la definición de calidad de sonido, y es que no existe una definición sobre qué combinaciones de sonido tiende a gustar a la gente. La regla de la consonancia-disonancia (Rule RC-D) propuesta por Šali and Kopač [34], se basa en relaciones entre ratios subjetivos e intervalos de frecuencia. El método RC-D desarrolla un ratio numérico de calidad de sonido basado en sumas de magnitudes de frecuencias.

Partiendo de que un sonido siempre será más agradable contra más concentradas estén las frecuencias en los armónicos (frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental), Šali and Kopač llegan a correlar un ratio llamado “*Order of Merit*” que corresponde a un ratio directamente proporcional con la consonancia (a mayor ratio, mayor consonancia) con los intervalos frecuenciales, y el resultado es el siguiente:

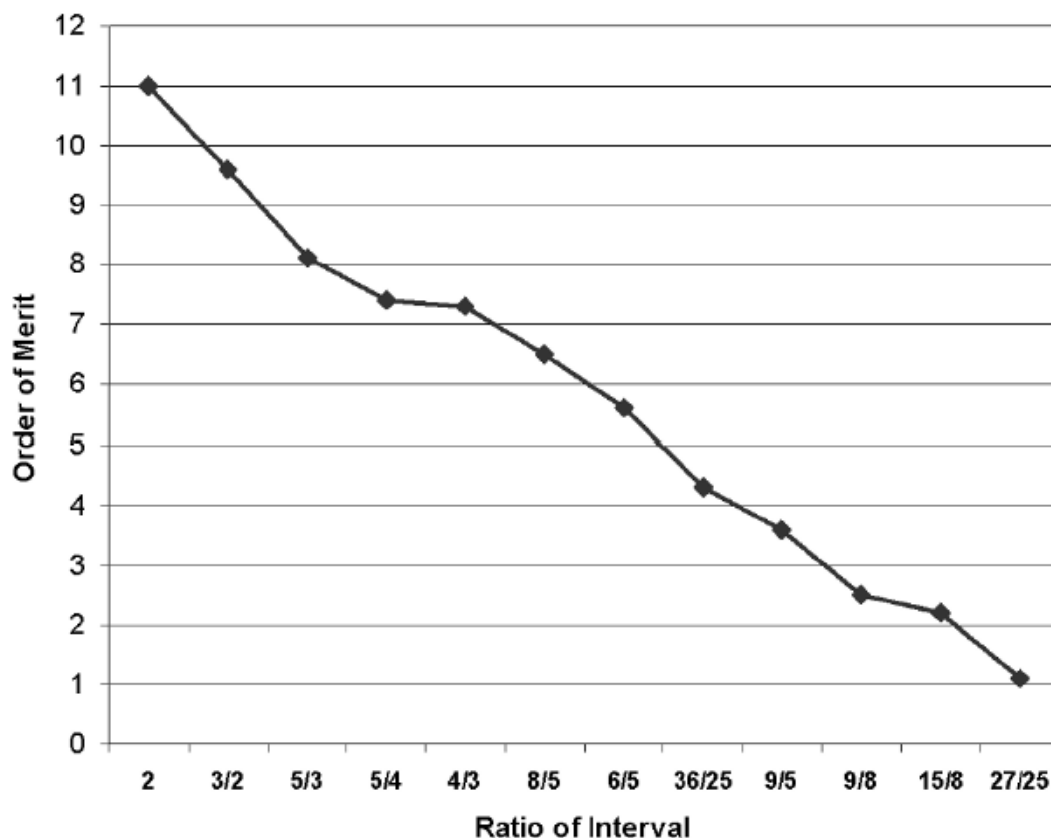


Ilustración 94

Šali and Kopač notaron también que el la calidad osnora de una guitarra es mayor, cuando los dos primeros armónicos corresponden a los picos de mayor magnitud en la FFT.

Ratios subjetivos

La gran mayoría de los ratios con los que valoramos una guitarra son subjetivos, y se ha escrito mucho sobre ello en la literatura de la acústica.

Cuando un grupo de músicos o expertos en valorar instrumentos, evalúan un grupo de instrumentos, tienden a coincidir en el orden en que los instrumentos deberían estar clasificados acorde a la calidad de su sonido. Para valorar este grupo de instrumentos se suelen usar el método de la comparación por parejas, una técnica en la que se van comparando las guitarras o instrumentos de dos en dos y se van descartando.

El número de pares con los que se pueden valorar “n” instrumentos usando éste método se muestra en la imagen siguiente:

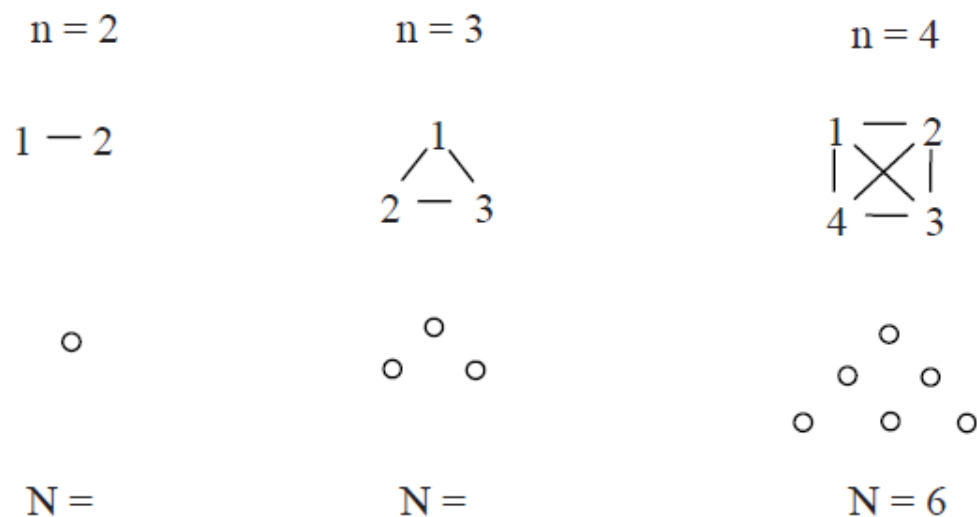


Ilustración 95

El número de posibles comparaciones viene descrito por la fórmula siguiente:

$$N = \frac{n - n^2}{2}$$

Para valorar entre dos guitarras se suelen usar adjetivos subjetivos como brillante o suave. Los que más se usan son:

Clear – Diffuse and Sharp – Smooth

Se suelen asociar los siguientes parámetros a calidad de sonido:

- Largo tiempo de ataque
- Baja variación del tiempo de ataque entre cuerdas
- Alto nivel de sonido por debajo de 1000 Hz
- Alta amplitud en los dos primeros armónicos
- Adjetivos limpio, seco y brillante.

ENSAYOS EXPERIMENTALES

Objetivo

El objetivo principal del proyecto es hacer un estudio cuantitativo del sonido de la guitarra. Para ello debemos hacer ensayos experimentales y gracias al departamento de acústica de la UPC de Terrassa, LEAM (Laboratori d'Enginyeria Acústica i Mecànica), hemos podido realizar los ensayos en el laboratorio de acústica con todos sus equipos, medios e instalaciones. Como objetivo principal, queríamos encontrar una relación entre el sonido que producen distintas gamas de guitarras españolas y sus representaciones gráficas (espectro, envolvente...). Al ser un estudio experimental, no sabíamos que nos íbamos a encontrar de antemano, ya que hubiera sido posible que los resultados no fueran los esperados.

El sonido de una guitarra es muy difícil de clasificar y compararlo con el de otras guitarras de la misma gama. Actualmente, los fabricantes y vendedores de guitarra, para catalogar y poner precio y gama a una guitarra, disponen de un equipo de expertos con gran experiencia y capacidad a la hora de escuchar y analizar el sonido de una guitarra española únicamente con el oído. Este trabajo pretende hacer el mismo análisis basándose en las representaciones gráficas del sonido. Es cierto que entre guitarras de la misma gama la opinión del grupo de expertos es subjetiva y no suele ser unánime, pues a cada persona le puede parecer más bonito un matiz del sonido (calidez, brillantez, duración del sonido...). Es por eso, que debemos intentar definir propiedades del sonido de una guitarra con adjetivos que lo represente.

- Brillantez
- Calidez
- Duración
- Intensidad sonora

A partir de valorar estos aspectos del sonido, podremos llegar a relacionarlos con las gráficas temporales y frecuenciales que obtengamos de las mediciones.

Instrumentación

Gracias a la amabilidad y predisposición del departamento de acústica LEAM, hemos podido disponer de un equipo de medición de inestimable valor, y nos han servido para realizar los ensayos necesarios.

El laboratorio de acústica consta, por una parte, de una sala semianecoica, aislada de los ruidos exteriores. Gracias al material de las paredes, el sonido no se refleja y los micrófonos sólo captarán el sonido de la guitarra sin reflexiones.

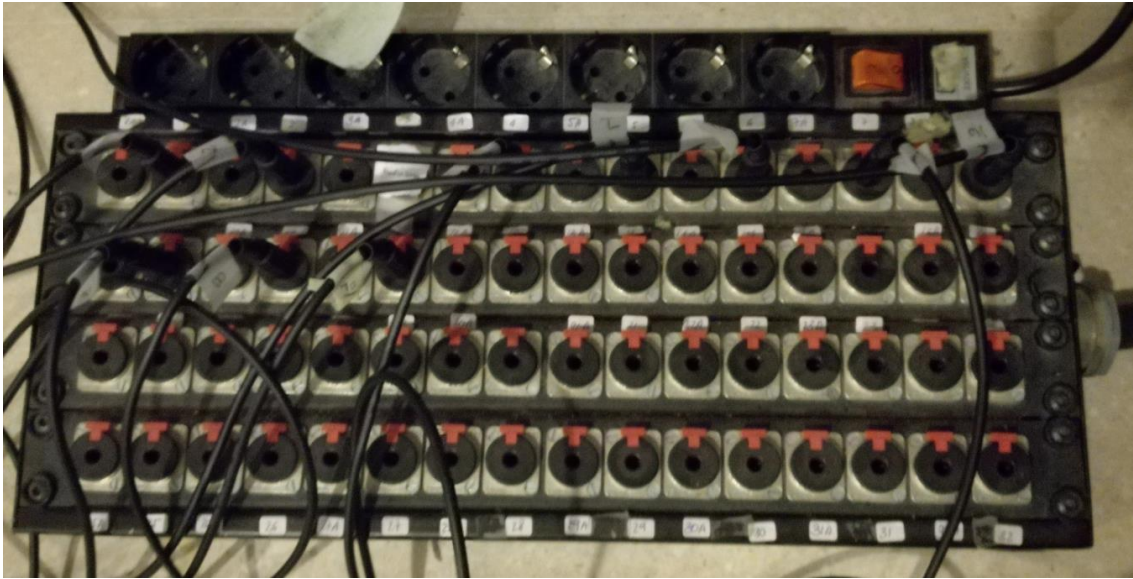


Ilustración 96

Dentro de la sala, disponemos de 10 micrófonos y un acelerómetro que irán conectados a un patchbay mediante conectores BNC para que podamos comunicarlos con nuestro ordenador y analizador de ruido.



Ilustración 97



Il·lustració 98

En el otro lado de la sala semianecoica, encontramos un escritorio donde tenemos el patchbay que nos comunica con la cámara, el ordenador y el sistema analizador de sonido.

El analizador de sonido consta de un hardware y un software de la marca Siemens, un LMS Test Express. Se trata de uno de los analizadores más potentes de su clase, con una tasa de hasta 204,8 kHz de muestreo por canal, 8 canales, resolución de 24 bits y el rango dinámico de 150 dB. Tiene un software fácil de entender y bastante intuitivo, que nos permite analizar los resultados obtenidos. Posee un analizador FFT (Fast Fourier Transform) en tiempo real de la transformada de Fourier, la densidad espectral de potencia (PSD), las potencias cruzadas...



Il·lustració 99

Metodología

Para realizar los ensayos, debemos disponer de distintas guitarras para poder comparar su sonido y las características acústicas. Es importante que sean de gamas distintas, ya que es donde mejor veremos las variaciones de las propiedades del sonido. Disponemos de 3 guitarras clásicas de gamas distintas:

- **Admira Infante:** Es una guitarra junior (pequeña), se compró hace aproximadamente 20 años. Su calidad sonora es baja. Tiene un sonido apagado, sin brillantez y poca intensidad sonora. A parte de que la calidad de la guitarra es baja, esto es debido a que ha pasado los últimos 10 años encerrada expuesta a mucha humedad, y eso provoca que el sonido de la guitarra sea más apagado



Ilustración 100

- **Vicente Tatay Tomás:** Guitarra de gama media-baja. Tiene aproximadamente 17 años, y su sonido ha ido empeorando con el tiempo, a causa de estar expuesta a humedad y calor. Es una guitarra clásica, con la tapa armónica de cedro y fondos de palosanto. Su sonido es cálido, pero no brillante y su sonido no se apaga rápidamente.



Ilustración 101

- Guitarras Camps M-10: Es la guitarra de gama más alta que disponemos. Consiste en una guitarra clásica de cedro. Ha tenido un buen mantenimiento (sólo tiene un año y medio) y su sonido es cálido brillante y de larga duración.



Ilustración 102

La metodología que vamos a usar es la siguiente. Realizaremos dos tipos de ensayos. Uno para determinar la potencia e intensidad acústica y otro para determinar las características acústicas del sonido.

PASOS PREVIOS:

Primero de todo, debemos tener nuestro equipo a punto. Para ello debemos calibrar todos los sensores. Los micrófonos los calibraremos con un calibrador que emite una señal a 94 dB y según la señal que reciba nuestro analizador de señales se autocalibra con un factor de corrección.

Para garantizarla repetitividad de ambos ensayos, realizaremos las mediciones estimulando la guitarra a la altura de la boca, a unos 15 cm del puente. Se hará un ensayo para determinar la intensidad acústica: La cuerda siempre estará sometida a una precarga de 20 N. Se harán cinco mediciones por cuerda para asegurar la repetitividad. En total obtendremos 30 muestras por guitarra (90 en total), de las que haremos una media para cada cuerda.

1. Ensayo para determinar la potencia e intensidad acústica

En el primer tipo de ensayo trataremos de relacionar la intensidad acústica de la guitarra con la fuerza que se le aplica a una cuerda para que vibre. Como deseamos saber la fuerza exacta, no podremos estimular la guitarra manualmente (con los dedos). Para ello habíamos pensado en usar un Shaker (con un generador de señales vibratorias) pero generaba mucho ruido, por lo que la captación del sonido no sería la correcta. De esta manera tendríamos una estimulación constante a lo largo del tiempo, por lo que no podríamos evaluar la duración del sonido, por lo que tuvimos que pensar en otra idea.

Luego pensamos en una alternativa más manual. Con la ayuda de un dinamómetro tensamos una cuerda de la guitarra hasta llegar a 20 N (2Kg) y soltamos de golpe dejando la cuerda vibrar libremente. Con la ayuda del software, registraremos una envolvente temporal en la que podremos analizar tanto la intensidad (dB) como la duración del sonido hasta apagarse. De esta manera sí podemos evaluar la duración del sonido, ya que efectuamos una única estimulación puntual, en lugar de una estimulación constante. Obviamente también podemos analizar las frecuencias predominantes haciendo una FFT.

El punto de aplicación de la fuerza será aproximadamente a unos 15 cm del puente (para las guitarras de tamaño normal) y a unos 12 cm del puente de la guitarra Admira.

Como hemos dicho, para garantizar la respetabilidad del ensayo, realizaremos 5 medidas por cada cuerda. Cada guitarra tiene seis cuerdas y tenemos tres guitarras, por lo que nos quedarán 90 muestras.

2. Ensayo para determinar la calidad sonora

Podemos hacer otro ensayo en el que estudiemos las características de la calidad sonora de la guitarra. En el ensayo anterior, la cuerda se estimula de manera brusca, sometiéndola a una precarga de 20 N y retirando esa fuerza instantáneamente. De esta manera no tenemos sensibilidad, y el sonido que emite siempre será más brusco, más sucio y con más vibraciones indeseadas y no controladas.

En este ensayo estimularemos la cuerda de la guitarra con los dedos, ganando sensibilidad y calidad sonora. Aquí es donde podremos estudiar aspectos del sonido como la calidez y la brillantez, ya que serán las que nos encontraremos cuando cualquier usuario toque una guitarra.

Este ensayo lo realizaremos de la siguiente manera. Tocaremos primero cinco veces la cuerda suavemente, con la yema de los dedos y con sensibilidad. Posteriormente atacaremos la cuerda con la uña con más brusquedad (típico del toque flamenco o cuando rasgamos con todos los dedos).

El objetivo de este ensayo es ver como varían las propiedades acústicas y sus representaciones gráficas según la manera de tocar. En clásico por ejemplo, se suele tocar con sensibilidad, suave, con la yema de los dedos para generar un sonido más cálido. En flamenco por ejemplo la técnica suele ser más agresiva, atacando con más agresividad a la cuerda para obtener un sonido más seco.

Post ensayo

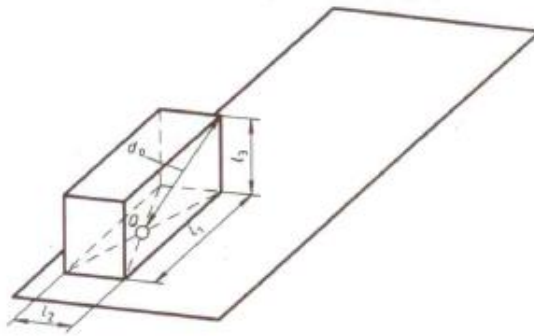
Una vez tenemos las medidas hechas, debemos procesar los resultados. El software nos da la posibilidad de exportar los resultados en formato .csv, compatible con Excel. Como debemos de hacer transformadas de Fourier (FFT) para ver los espectros, armónicos y frecuencias propias debemos usar una herramienta que nos permita hacerlo, y hemos decidido usar Matlab.

Montaje y preparación

Para realizar el ensayo nos basaremos en la norma UNE-EN ISO 3774 “Determinación de la potencia acústica por presión” que nos ha podido proporcionar LEAM. En lo que nos concierne, podemos resumir algunos aspectos que trata la norma:

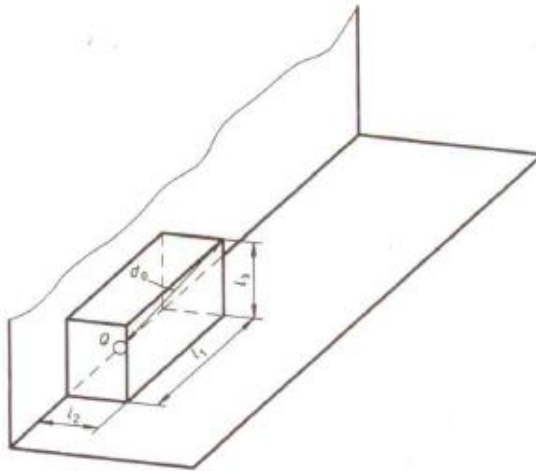
- Entorno acústico: Debemos realizar los ensayos en una cámara de laboratorio en la que se consiga un campo libre sobre un plano reflectante. El entorno debe estar libre de objetos reflectantes. El nivel de ruido de fondo no debe superar los 15 dB por debajo de la presión acústica a medir.
- Instrumentación: La instrumentación (micrófonos, acelerómetros...) deben estar correctamente calibrados. Los calibradores deben verificarse una vez al año.
- Instalación y montaje: La manera en la que se instala la fuente bajo ensayo puede tener una gran influencia en la medida de la potencia acústica. La fuente debe estar suficientemente lejos de cualquier pared o techo reflectante. La disposición de los instrumentos depende de los ensayos a realizar.

Como superficie de medición, usaremos una superficie semiesférica de radio “ r ” con la fuente situada en el centro, considerándola como un paralelepípedo, de una dos o tres superficies reflectantes. En nuestro caso tendremos únicamente una superficie reflectante, que será el suelo:



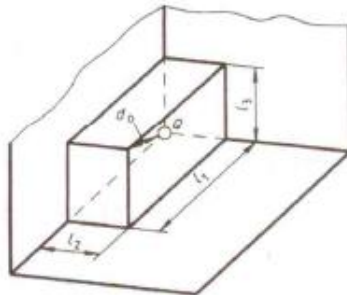
a) Paralelepípedo de referencia sobre un plano reflectante

$$d_0 = \sqrt{(l_1 / 2)^2 + (l_2 / 2)^2 + l_3^2}$$



b) Paralelepípedo de referencia con dos planos reflectantes

$$d_0 = \sqrt{(l_1 / 2)^2 + (l_2 / 2)^2 + l_3^2}$$



c) Paralelepípedo de referencia con tres planos reflectantes

$$d_0 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}$$

Ilustración 103

Como nuestra fuente emite frecuencias discretas, la disposición de los micrófonos debe ser la que nos impone la tabla B.2 de la norma. Esta tabla nos da una serie de coordenadas en las que se tienen que encontrar nuestros micrófonos dependiendo del radio de la superficie semiesférica de captación, considerando el origen como el centro de la semiesfera proyectado en el suelo:

Tabla B.2 – Coordenadas de las posiciones de micrófono para fuentes que emiten frecuencias discretas

Posición de micrófono	$\frac{x}{r}$	$\frac{y}{r}$	$\frac{z}{r}$
1	0,16	-0,96	0,22
2	0,78	-0,60	0,20
3	0,78	0,55	0,31
4	0,16	0,90	0,41
5	-0,83	0,32	0,45
6	-0,83	-0,40	0,38
7	-0,26	-0,65	0,71
8	0,74	-0,07	0,67
9	-0,26	0,50	0,83
10	0,10	-0,10	0,99

Tabla 11

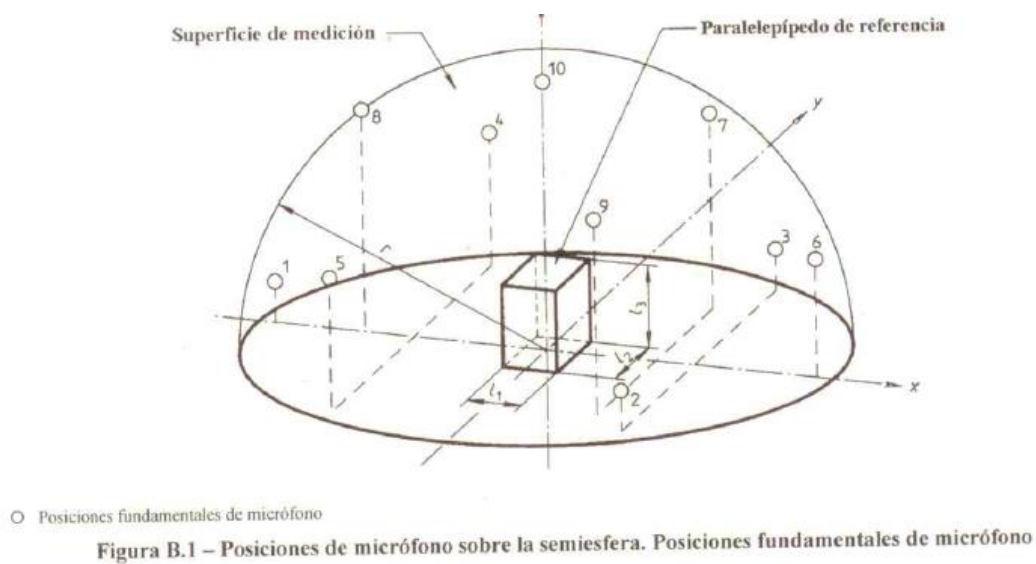


Ilustración 104

A continuación podemos ver la imagen de la disposición de los micrófonos proyectada en los planos:

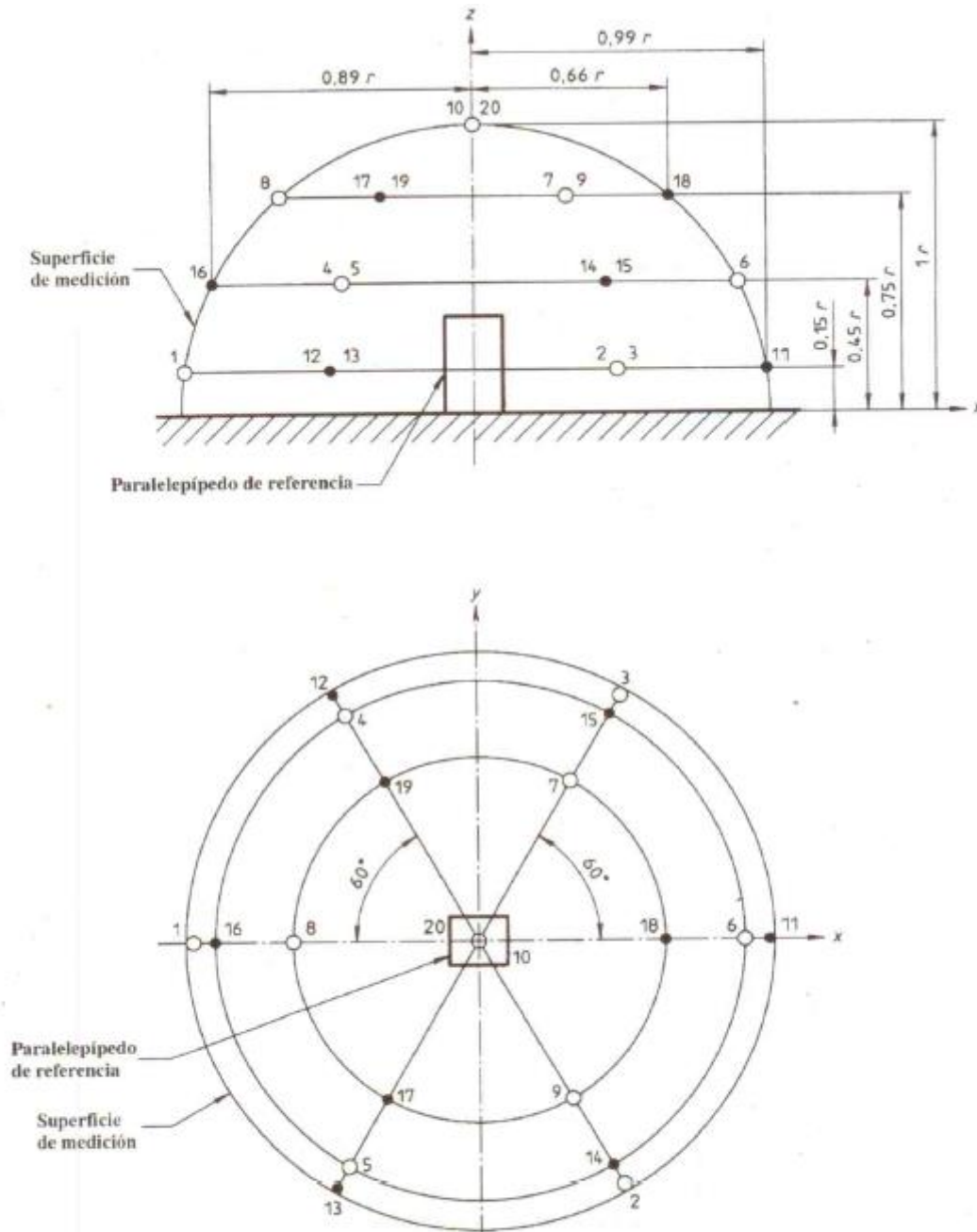


Figura B.2 – Posiciones de micrófono sobre la semiesfera

Il·lustració 105

La càmera semianecoica del laboratori ja compleix amb els requisits de entorn de mesura de la norma i la instrumentació i instal·lació també. Entones només ens falta col·locar els micròfons segons la norma.

Para finalizar mostraremos una imagen con el montaje hecho, los micrófonos posicionados según la norma y la fuente emisora lista para ser medida.

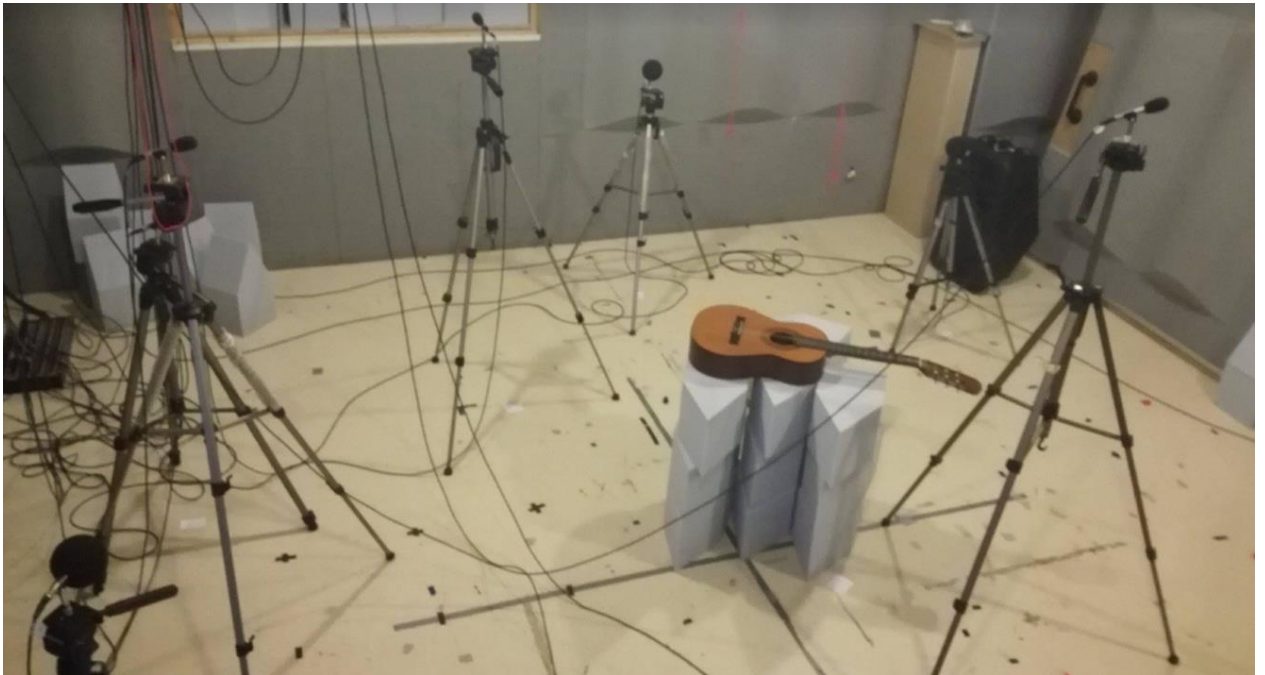


Ilustración 106

Medidas

Ensayo para determinar la potencia e intensidad acústica

Para desarrollar este ensayo nos hemos basado estrictamente en la norma:

UNE-ES ISO 3744: Determinación de los niveles de potencia acústica de fuentes de ruido a partir de la presión acústica.

Esta norma facilita unas pautas para registrar la información de las medidas, y siguen el siguiente orden:

Fuente bajo ensayo

Primero propone definir la fuente de sonido que ya la tenemos definida. Nuestra fuente serán tres guitarras descritas anteriormente.

Luego las condiciones de funcionamiento, hemos explicado cómo realizaremos el ensayo, con la ayuda de un dinamómetro sometiendo a las cuerdas a una precarga de 20N y soltándolas de golpe.

Finalmente nos pide determinar las condiciones de montaje. En nuestro caso el montaje es simple. Apoyar la guitarra horizontalmente sobre una superficie del material de las paredes de la cámara semianecoica y el dinamómetro se ha acoplado a la guitarra mediante un filamento de nylon.

Descripción del entorno acústico

Hemos comentado anteriormente que disponemos de una cámara semianecoica del laboratorio de LEAM. Esto nos definirá algunos parámetros que necesitaremos para el cálculo de presión y potencia. Si acudimos a la Tabla 0.1 encontramos las normas internacionales para la determinación de niveles de potencia acústica de fuentes de ruido que usan métodos de superficie envolvente sobre un plano reflectante, con indicación en los diferentes grados de precisión:

Tabla 0.1 – Normas internacionales para la determinación de niveles de potencia acústica de fuentes de ruido que usan métodos de superficie envolvente sobre un plano reflectante, con indicación de los diferentes grados de precisión

Parámetro	ISO 3745 Precisión Grado 1	ISO 3744 Peritaje Grado 2	ISO 3746 Control Grado 3
Entorno de ensayo	Cámara semianecoica	Aire libre o interiores	Aire libre o interiores
Criterio de adecuación del entorno de ensayo ¹⁾	$K_2 \leq 0,5$ dB	$K_2 \leq 2$ dB	$K_2 \leq 7$ dB
Volumen de la fuente de ruido	Preferiblemente inferior al 0,5% de la cámara de ensayo	Sin restricciones; limitado sólo por el entorno disponible	Sin restricciones; limitado sólo por el del entorno disponible
Carácter del ruido	Cualquier (banda ancha, banda estrecha, frecuencias discretas, estable, no estable, impulsivo)		
Limitación por ruido de fondo ¹⁾	$\Delta L \geq 10$ dB (si es posible, mayor de 15 dB) $K_1 \leq 0,4$ dB	$\Delta L \geq 6$ dB (si es posible, mayor de 15 dB) $K_1 \leq 1,3$ dB	$\Delta L \geq 3$ dB $K_1 \leq 3$ dB
Número de puntos de medición	≥ 10	$\geq 9^{2)}$	$\geq 4^{2)}$
Instrumentación: – sonómetro (requisitos mínimos) – sonómetro integrador (requisitos mínimos) – juego de filtros pasabanda (requisitos mínimos)	a) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60651 b) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60804 c) clase 1, especificado en la Norma IEC 60225	a) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60651 b) tipo 1, especificado en la Norma IEC 60804 c) clase 1, especificado en la Norma IEC 60225	a) tipo 2, especificado en la Norma IEC 60651 b) tipo 2, especificado en la Norma IEC 60804 –
Precisión del método para determinar L_{WA} , expresado como desviación típica de la reproducibilidad	$\sigma_R \leq 1$ dB	$\sigma_R \leq 1,5$ dB	$\sigma_R \leq 3$ dB (si $K_2 < 5$ dB) $\sigma_R \leq 4$ dB (si $5 \text{ dB} \leq K_2 \leq 7 \text{ dB}$) Si predominan frecuencias discretas, el valor de σ_R es 1 dB mayor

1) Los valores dados de K_1 y K_2 deben encontrarse, en cada banda de frecuencia, dentro del margen de frecuencias de interés para determinar el espectro de potencia acústica. Para determinar los niveles de potencia acústica ponderados A, se aplica el mismo criterio a K_{1A} y K_{2A} .

2) En determinadas circunstancias (véanse 7.2 a 7.4) se permite usar un número menor de posiciones de micrófono.

Tabla 12

En nuestro caso nos encontramos en el Grado 1 – Precisión, ya que nuestro entorno e ensayo es una cámara semianecoica. El anexo A nos indica algunas orientaciones para realizar nuestro ensayo según el entorno que hemos tenido en cuenta.

Instrumentación

Este apartado también lo hemos comentado anteriormente, ya que se usan casi los mismos instrumentos en todos los ensayos (a excepción del acelerómetro).

La calibración también se ha explicado (calibrados a 94 dB).

Resultados acústicos

Este último punto lo explicaremos detalladamente en el apartado *“Interpretación de resultados”*.

A continuación explicaremos el criterio que se ha tenido en cuenta a la hora de tomar medidas y procesarlas.

Como hemos explicado, hemos captado cada medida con 10 canales (10 micrófonos) situados en un punto concreto del espacio, formando una semiesfera. Cada uno de los micrófonos ha captado una señal bastante similar a los demás, pero no exacta. Una vez hemos tenido los ficheros con todos los datos los hemos procesado mediante el programa Matlab, creando un código que nos permita hacer un procesamiento estándar, rápido y exacto para todas las medidas. En ese código hemos recortado la señal para que todas tengan un aspecto similar y empiecen en el mismo índice aproximadamente, y hemos decidido extraer los valores de pico máximo y los valores RMS. Además hemos querido aprovechar los ensayos para extraer información que utilizaremos en el estudio de la calidad sonora.

A continuación mostramos algunas señales graficadas para ver su aspecto. Corresponde a la grabación del micrófono nº4 de la 6ª cuerda (Mi grave) de las tres guitarras distintas:

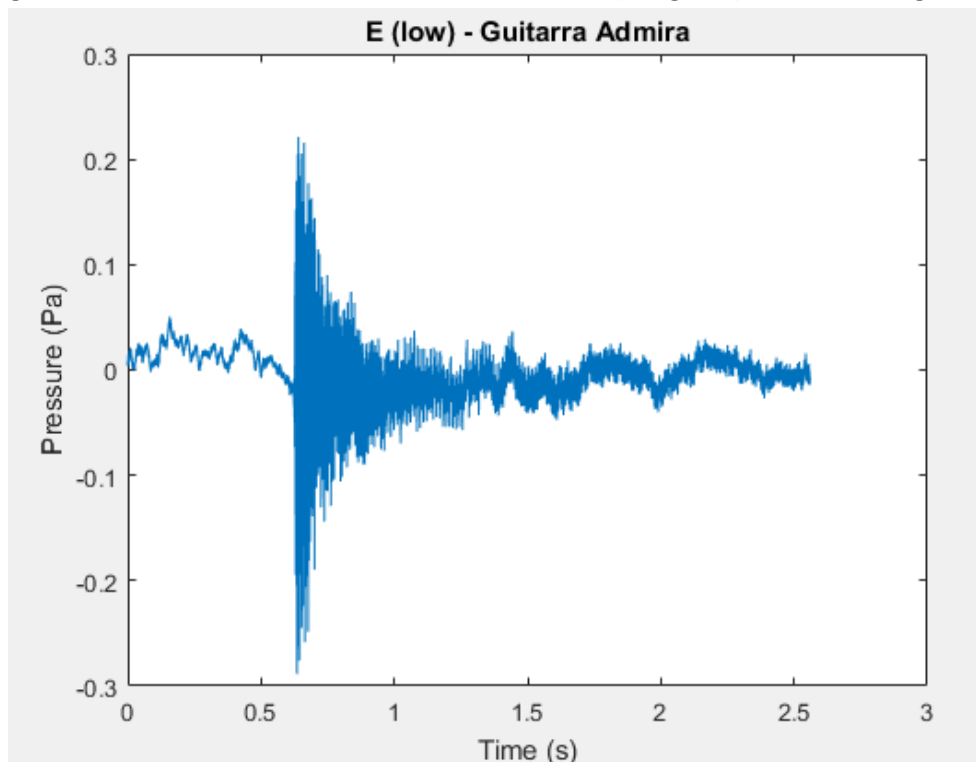
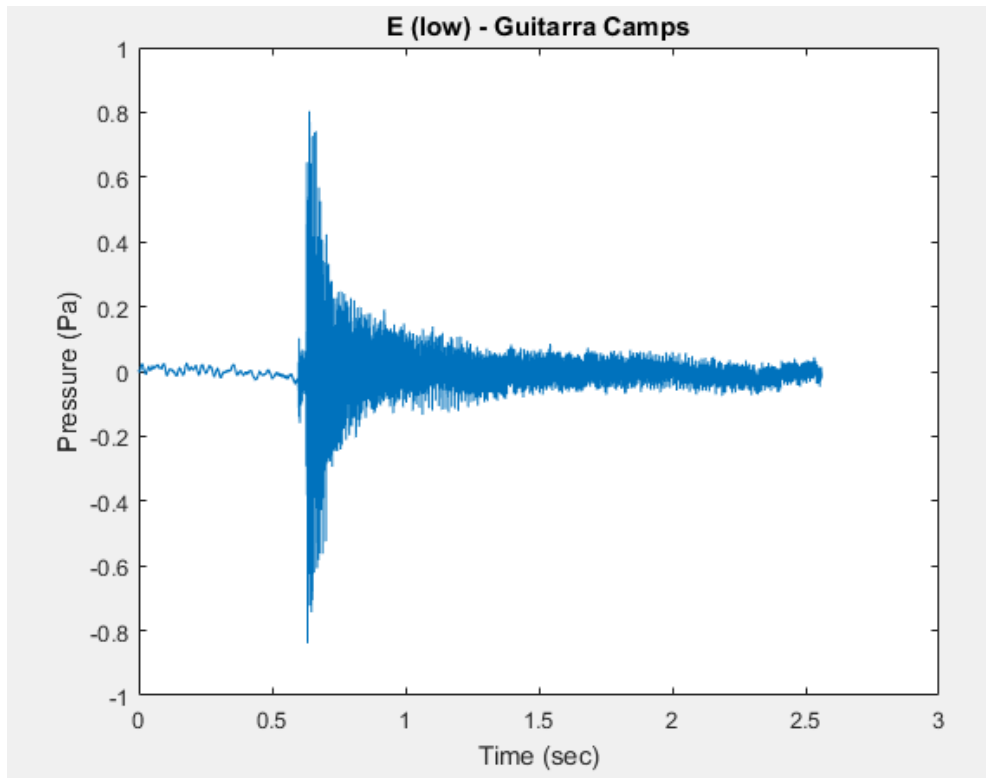
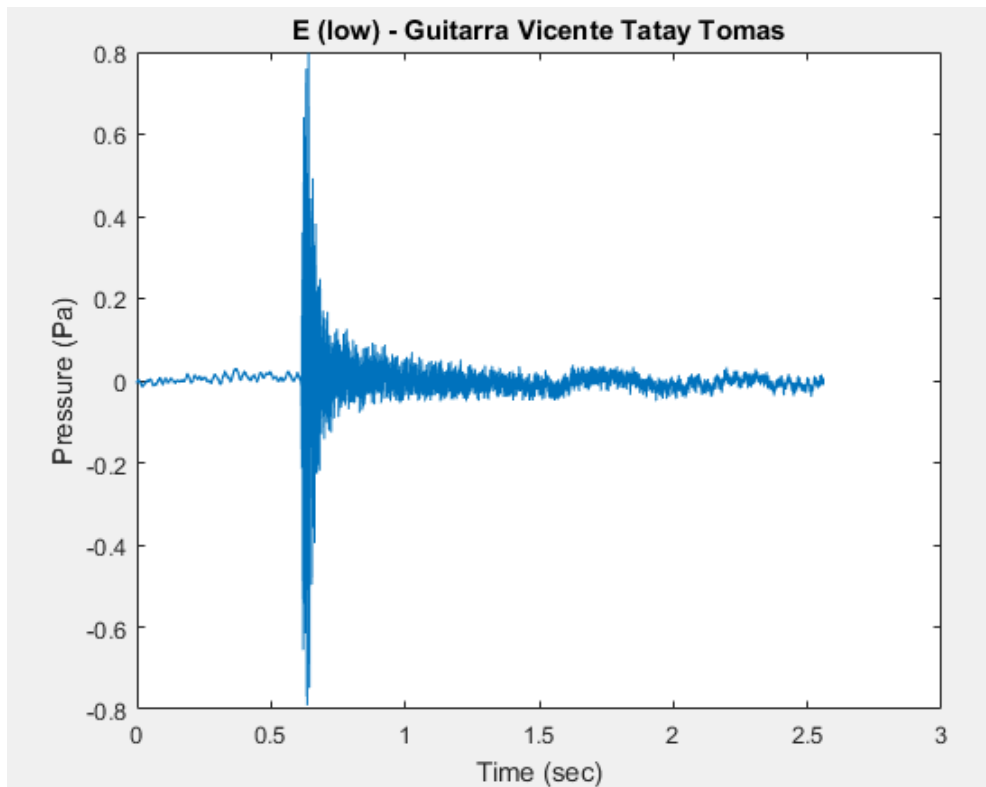


Ilustración 107



Il·lustració 108



Il·lustració 109

Aquí podemos observar como las tres envolventes empiezan en el mismo instante, y tienen aproximadamente la misma duración.

Los valores extraídos de presión acústica (máximo y eficaz, RMS) son los siguientes:

		VALORES RMS	VALORES MAXIMOS
Guitarra	Cuerda	Presión acústica promediado (Pa)	Presión acústica promediado (Pa)
T A T A Y	EL	0,12447628	1,304509323
	A	0,09303426	0,974997484
	D	0,080090067	0,839342558
	G	0,078712526	0,824905948
	B	0,060465292	0,633675247
	EH	0,06420957	0,67291522
C A M P S	EL	0,114057059	1,195316065
	A	0,119099425	1,248159975
	D	0,099913732	1,047094232
	G	0,085999399	0,901272264
	B	0,081338484	0,852425947
	EH	0,074137266	0,776957305
A D M I R A	EL	0,051428231	0,538966994
	A	0,070603518	0,739923681
	D	0,052426824	0,549432241
	G	0,043432573	0,455172639
	B	0,047051471	0,493098631
	EH	0,041331761	0,433156167

Tabla 13

Ensayo para determinar la calidad sonora

En el siguiente ensayo nos centraremos en estudiar la calidad del sonido de cada guitarra basándonos en algunos parámetros. Para ello usaremos datos extraídos del primer ensayo, el de potencia acústica.

Así como en el primer estudio hemos extraído los datos de presión acústica, en el siguiente, extraeremos los armónicos (con sus amplitudes), la frecuencia fundamental, y el tiempo de decaimiento.

El proceso que hemos seguido para obtener estos datos es el siguiente:

Armónicos

Partiendo de la señal obtenida en el primer ensayo, hemos realizado una transformada de Fourier (FFT) para ver los armónicos y frecuencias predominantes de la señal. Hemos podido hacerlo gracias a la función *fft* de Matlab.

Una vez obtenida la señal transformada, hemos buscado los picos máximos mediante la función *findpeaks()* y hemos aplicado el criterio siguiente. Buscar los diez picos de la señal que sobrepasen los 200 Pa y que estén distanciadas como mínimo 40 Hz respecto sus vecinos. Este criterio lo hemos aplicado en base de que el ruido de fondo captado por los micrófonos no suele sobrepasar los 200 Pa (entre 100 y 200 Pa) y el objetivo es encontrar armónicos (frecuencias múltiples de la frecuencia fundamental), por lo que todos aquellos picos que estén comprendidos entre armónicos no serán los deseados. Teniendo en cuenta que la frecuencia fundamental más baja (la 6ª cuerda, un Mi de 82,4 Hz), hemos aplicado un criterio de no encontrar picos más cercanos entre sí, que la mitad de la distancia más corta entre armónicos. En este caso, la frecuencia fundamental más baja es 82,4 Hz y la mitad son 40 Hz aproximadamente.

Una vez tenemos los picos encontrados, mediante el código Matlab, hemos extraído los diez picos de frecuencia con sus respectivas amplitudes. Si los diez picos corresponden a armónicos, la calidad sonora será mejor y a medida que haya menos armónicas la calidad va bajando. De cada una de las 5 muestras que hemos realizado por cuerda, captamos la señal con 10 micrófonos, y cada micrófono captara un número de armónicos distintos según la suma de ondas sinusoidales que le lleguen. El procedimiento que seguiremos es, escoger el ensayo más representativo de cada cuerda, y ver qué armónicos vemos más repetidos en los canales y cuantos picos no corresponden a armónicos.

Tiempo decaimiento

Se define tiempo de decaimiento, como el tiempo que tarda una señal en pasar de estar al 90% hasta el 10% de su máxima amplitud. Para calcular ese tiempo, usaremos la señal obtenida en el primer ensayo también. Para ello, en el código Matlab deberemos crear una envolvente de la señal para que nuestra nueva señal sea continua y uniforme. Para ello hemos acudido a la función *envelope()* con una frecuencia de muestreo de 3000 Hz y hemos creado un nuevo intervalo de tiempo para esa señal, ya que al obtener una nueva señal con un número de puntos inferior, debemos tener el mismo número de puntos en el dominio tiempo.

Una vez hemos creado la envolvente, recortamos la señal desde el punto de máxima amplitud hasta el final, con el fin de trabajar con un menor número de puntos. Posteriormente la volveremos a recortar, en el punto en el que la amplitud de la señal corresponda a un 10% del primer valor (valor de máxima amplitud). Finalmente calculamos el tiempo que tarda la señal hasta llegar al 90% de su máxima amplitud y restando el tiempo total de la señal recortada menos el tiempo que tarda hasta llegar al 90% obtendremos el tiempo de decaimiento.

Este valor nos puede servir para valorar un aspecto de la calidad de una guitarra, y es el tiempo que tarda el sonido en apagarse. Una guitarra, en la que el sonido se apague rápidamente no será de buena calidad, ya que el instrumento requiere de un tiempo paulatino de decrecimiento del sonido.

Interpretación y procesamiento de resultados

Ensayo para determinar la potencia e intensidad acústica

Una vez exportados los valores de presión, debemos procesarlos para llegar a tener valores de presión acústica superficial y potencia acústica. Para ello seguiremos el algoritmo de fórmulas que aparece en la norma UNE.

Presión acústica promediada sobre la superficie de medición

Primero debemos obtener un valor de presión acústica promediado sobre la superficie de medición. Una vez obtenidos los valores de presión acústica en cada micrófono, si aplicamos la siguiente fórmula obtenemos la presión promediada:

$$\overline{L'_p} = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} 10^{0.1 \cdot L_{pi}} \right] \text{ (dB)}$$

Donde:

$\overline{L'_p}$ Es el nivel de presión acústica promediado sobre la superficie de medición, en decibelios, con la fuente bajo ensayo funcionando;

$\overline{L'_{pi}}$ Es el nivel de presión acústica medido en la posición i-ésima del micrófono, en decibelios;

N Es el número de posiciones de micrófono;

Nota: El procedimiento de promediación de la ecuación está basado en una distribución uniforme de posiciones de micrófono sobre la superficie de medición.

Posteriormente debemos valorar dos factores de corrección:

Factor de corrección por ruido de fondo

La corrección K1 por ruido de fondo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$K1 = -10 \cdot \log(1 - 10^{-0.1\Delta L})$$

Donde

$$\Delta L = \overline{L'_p} - \overline{L_p^n}$$

$\overline{L_p^n}$ Corresponde al valor de presión de ruido de fondo. Estos valores los podemos obtener de la Tabla 0.1 que hemos visto anteriormente. Para un ensayo de Grado 1 Precisión, $\Delta L \geq 10 \text{ dB}$. En nuestro caso consideraremos $\Delta L = 10 \text{ dB}$ basándonos en el ruido de fondo de las medidas obtenidas.

Si calculamos el factor K1 con $\Delta L = 10 \text{ dB}$ obtenemos un factor de corrección de $K1=0,4576 \text{ dB}$.

Factor de corrección por entorno acústico de ensayo

La corrección por entorno acústico de ensayo K2, se determina mediante unos procedimientos descritos en el anexo A.

En nuestro caso acudimos a la tabla y obtenemos un valor de $K2 = 0.5 \text{ dB}$

Presión acústica superficial

Una vez calculados los factores de corrección y la presión acústica promediada, podemos calcular la presión acústica superficial mediante la fórmula:

$$\overline{L'_{pf}} = \overline{L'_p} - K1 - K2$$

Y sustituyendo nos queda:

$$\overline{L'_{pf}} = \overline{L'_p} - 0,4576 - 0,5 = \overline{L'_p} - 0,9576$$

Finalmente nos podemos disponer a calcular la potencia acústica. El nivel de potencia acústica L_w , debe calcularse aplicando la siguiente ecuación:

$$L_w = \overline{L'_{pf}} + 10 \cdot \log\left(\frac{S}{S_0}\right)$$

Donde,

$\overline{L'_{pf}}$ Es el nivel de presión acústica superficial;

S Es el área de la superficie de medición, en metros cuadrados;

$S_0 = 1m^2$

Solo nos queda calcular el área de nuestra superficie de medición. Como se trata de una semiesfera de radio r , la fórmula para calcular el área es:

$$S = 2\pi r^2$$

En nuestro caso, hemos creado una superficie semiesférica de radio 2m, sustituyendo:

$$S = 2 \cdot \pi \cdot 2^2 = 8\pi = 25,133 m^2$$

Ahora que tenemos todos los valores y datos, hemos calculado todos los parámetros mediante una tabla de Excel. Hemos hecho el mismo procedimiento para los valores máximos (picos) y para el valor eficaz (RMS). Los resultados son los siguientes:

Tabla de valores RMS:

		VALORES RMS			
Gitarras	Cuerda	Presión acústica promediado (Pa)	Presión acústica superficial (dB)	Presión acústica superficial	Potencia acústica (dB)
T A T A Y	EL	0,12447628	72,87083212	71,97083212	85,97323071
	A	0,09303426	70,34195827	69,44195827	83,44435687
	D	0,080090067	69,04067326	68,14067326	82,14307186
	G	0,078712526	68,88997707	67,98997707	81,99237567
	B	0,060465292	66,59922323	65,69922323	79,70162183
	EH	0,06420957	67,1210954	66,2210954	80,223494
C A M P S	EL	0,114057059	72,11154351	71,21154351	85,2139421
	A	0,119099425	72,48729341	71,58729341	85,58969201
	D	0,099913732	70,96160372	70,06160372	84,06400232
	G	0,085999399	69,6590085	68,7590085	82,7614071
	B	0,081338484	69,17502159	68,27502159	82,27742019
	EH	0,074137266	68,36983146	67,46983146	81,47223006
A D M I R A	EL	0,051428231	65,19313178	64,29313178	78,29553037
	A	0,070603518	67,94562691	67,04562691	81,04802551
	D	0,052426824	65,36017119	64,46017119	78,46256979
	G	0,043432573	63,72541134	62,82541134	76,82780993
	B	0,047051471	64,42056432	63,52056432	77,52296291
	EH	0,041331761	63,29477841	62,39477841	76,39717701

Tabla 14

Tabla de valores máximos:

		VALORES MAXIMOS			
Guitarra	Cuerda	Presión acústica promediado (Pa)	Presión acústica superficial (dB)	Presión acústica superficial	Potencia acústica (dB)
T A T A Y	EL	1,304509323	93,27804387	92,37804387	106,3804425
	A	0,974997484	90,74917003	89,84917003	103,8515686
	D	0,839342558	89,44788502	88,54788502	102,5502836
	G	0,824905948	89,29718883	88,39718883	102,3995874
	B	0,633675247	87,00643498	86,10643498	100,1088336
	EH	0,67291522	87,52830716	86,62830716	100,6307058
C A M P S	EL	1,195316065	92,51875526	91,61875526	105,6211539
	A	1,248159975	92,89450516	91,99450516	105,9969038
	D	1,047094232	91,36881548	90,46881548	104,4712141
	G	0,901272264	90,06622026	89,16622026	103,1686189
	B	0,852425947	89,58223335	88,68223335	102,6846319
	EH	0,776957305	88,77704322	87,87704322	101,8794418
A D M I R A	EL	0,538966994	85,60034353	84,70034353	98,70274213
	A	0,739923681	88,35283867	87,45283867	101,4552373
	D	0,549432241	85,76738294	84,86738294	98,86978154
	G	0,455172639	84,13262309	83,23262309	97,23502169
	B	0,493098631	84,82777607	83,92777607	97,93017467
	EH	0,433156167	83,70199017	82,80199017	96,80438876

Tabla 15

Una vez calculados los valores, podemos graficarlos para ver visualmente las tendencias y qué guitarra genera más potencia acústica.

Empezaremos graficando los valores máximos:

Primero, graficamos los niveles de presión acústica en Pascales medidos directamente por los micrófonos:

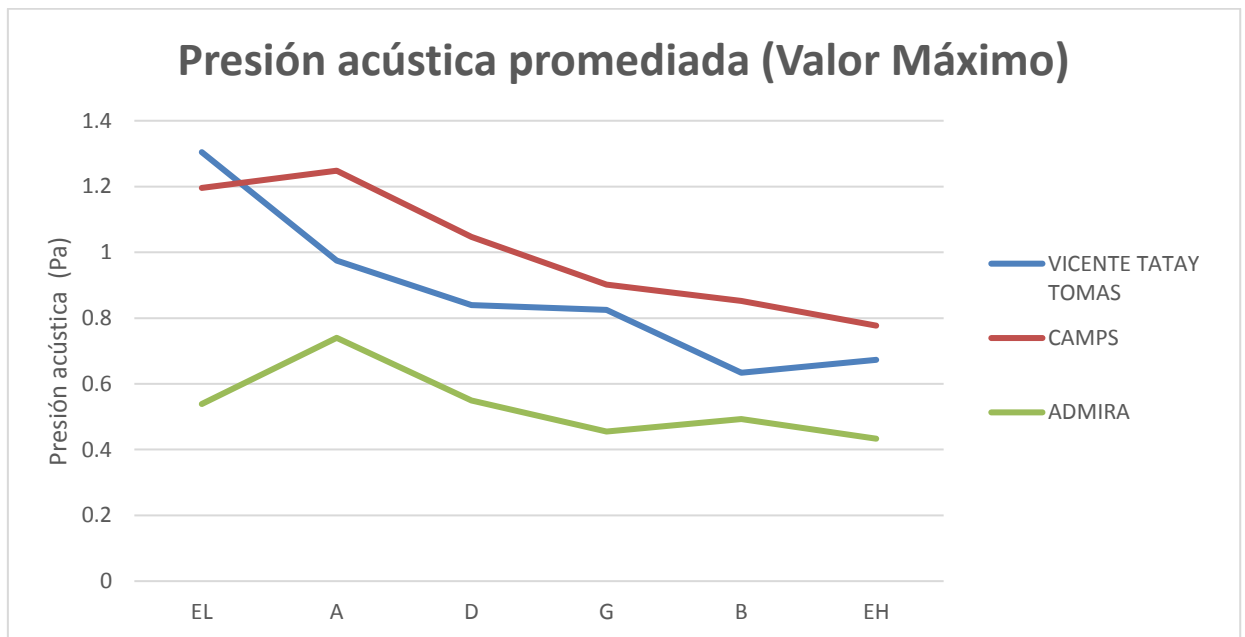


Ilustración 110

Lo primero que podemos observar en el gráfico es que la tendencia de la presión acústica es descendiente a medida que nos acercamos a las cuerdas más agudas. Es un resultado lógico, ya que los sonidos de baja frecuencia, generan un nivel de intensidad mayor que los sonidos de alta frecuencia. Podemos contrastar este dato con la siguiente gráfica, en la que vemos las líneas isofónicas en relación con la frecuencia.

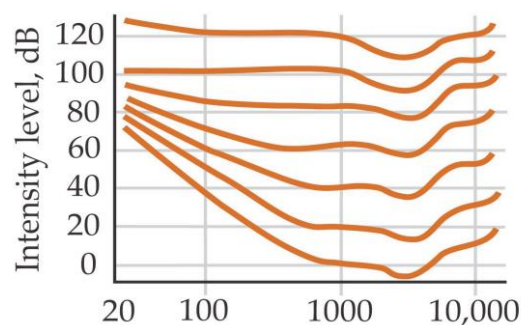


Ilustración 111

Observamos que a mayores frecuencias la intensidad disminuye. Además, las cuerdas superiores (graves) tienen más densidad lineal, y como consecuencia más masa, por lo que hacen mover una cantidad de aire mayor y tienen más inercia.

A continuación mostraremos el gráfico de la potencia acústica calculada según las ecuaciones descritas anteriormente:

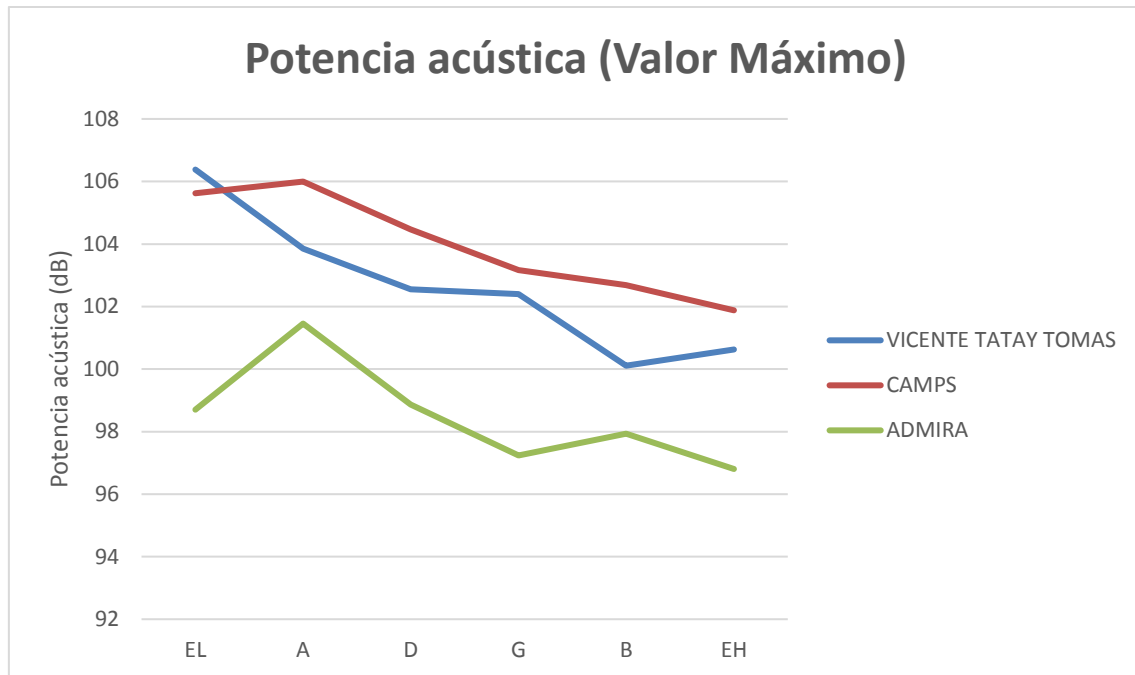


Ilustración 112

En este caso, obtenemos valores en decibelios, que nos da un valor más orientativo. Observamos que tenemos valores entorno a los 100 dB en general. Es un nivel de intensidad bastante elevado, pero debemos tener en cuenta que esta gráfica nos muestra los picos más altos de intensidad cuando estimulamos la cuerda mediante un dinamómetro sometido a 20N de precarga, mientras que normalmente un guitarrista no suele sobrepasar los 10 N aproximadamente.

Podemos observar en estas dos gráficas como los niveles de potencia acústica de las tres guitarras tienen el siguiente orden:

$$CAMPS > VICENTE TATAY > ADMIRA$$

Nos damos cuenta, que la guitarra que más potencia acústica emite es la Camps, que coincide con la guitarra de mayor calidad, y le sigue la Vicente Tatay Tomás y para finalizar la Admira, que es la de peor calidad.

En este inciso, debemos tener en cuenta que la guitarra Admira es una guitarra Junior, es decir, de menores dimensiones y esto afecta en el resultado, ya que la superficie de la tapa armónica es menor y el volumen de aire que contiene la caja también.

A continuación vamos a mostrar los mismos gráficos expresados en valor eficaz, RMS.

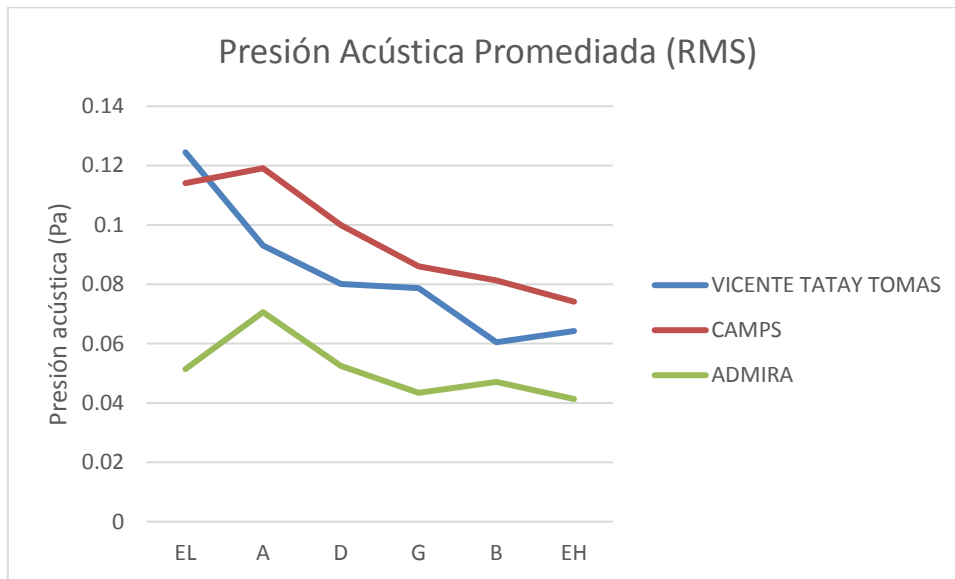


Ilustración 113

Observamos que la forma de la gráfica no cambia, pero sus valores sí, ya que corresponden al valor eficaz.

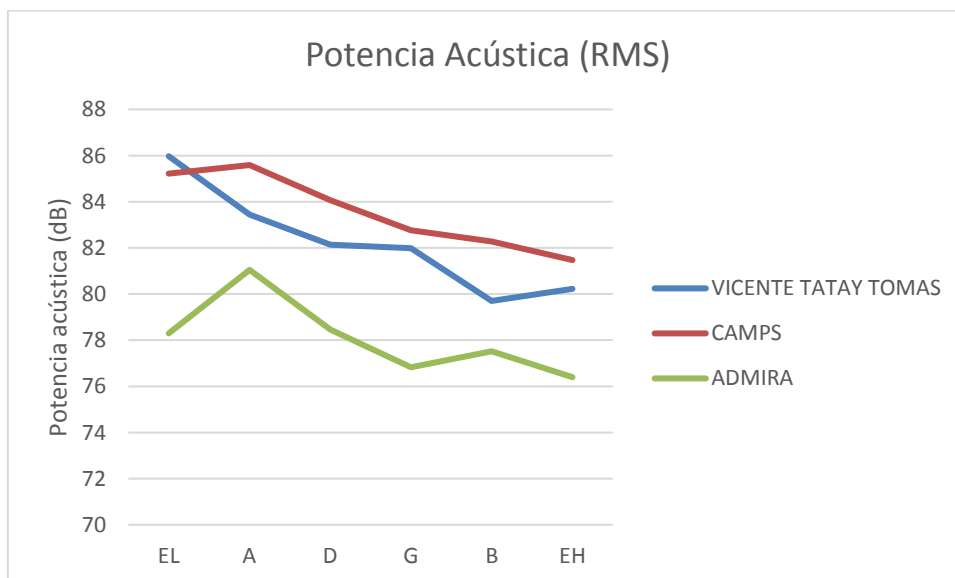


Ilustración 114

En esta última gráfica sí podemos apreciar un valor de potencia más coherente.

Para concluir, podemos sacar algunas conclusiones. La primera es que el valor de la presión y potencia acústica disminuye a medida que aumenta la frecuencia (hecho contrastado anteriormente). También podemos observar que la calidad de la guitarra suele ser directamente proporcional a la potencia acústica que emite. Esto no siempre es cierto, ya que existen guitarras de un nivel medio que pueden generar un alto nivel de potencia acústica, pero en guitarras de alta gama deben ser capaces de generar un nivel de potencia acústica elevado, sobretodo en guitarras de concierto.

Ensayo para determinar la calidad sonora

Armónicos

El procedimiento que seguiremos para estudiar la calidad sonora de la guitarra, en términos de armónicos, es el siguiente.

El código de Matlab nos exporta en una hoja de Excel las frecuencias de los 10 picos de la FFT y sus respectivas amplitudes, en hojas separadas. Cada una de las cinco muestras nos exportará dos hojas, en total tendremos 10 hojas. En cada hoja nos saldrán 100 valores, los diez picos (en frecuencia o en amplitud) de cada uno de los 10 canales. Tendrán un aspecto como este:

	AMPLITUD (Pa)									
Picos	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Nº1	376,863	392,759	773,355	394,793	398,133	387,493	345,356	403,339	412,856	373,095
Nº2	229,741	525,914	236,791	226,328	225,568	740,499	1726,061	297,761	188,764	630,877
Nº3	238,534	1689,497	1843,385	300,389	428,198	466,876	1128,146	1762,450	696,839	213,315
Nº4	246,240	421,240	341,544	222,374	626,716	872,611	901,811	868,565	319,778	350,965
Nº5	359,955	836,975	254,231	968,954	345,653	374,993	425,972	781,690	505,780	346,235
Nº6	688,558	203,469	216,837	508,912	313,983	358,307	476,799	243,014	254,999	505,407
Nº7	276,055	203,469	234,246	306,767	222,350	232,893	244,356	212,837	250,414	219,911
Nº8	331,215	836,975	253,014	212,007	426,543	617,984	468,539	212,837	545,538	580,186
Nº9	276,672	421,240	230,560	212,007	426,543	312,681	354,646	243,014	626,156	510,362
Nº10	634,242	1689,497	352,411	306,767	222,350	312,681	574,329	781,690	423,002	239,397

Tabla 16

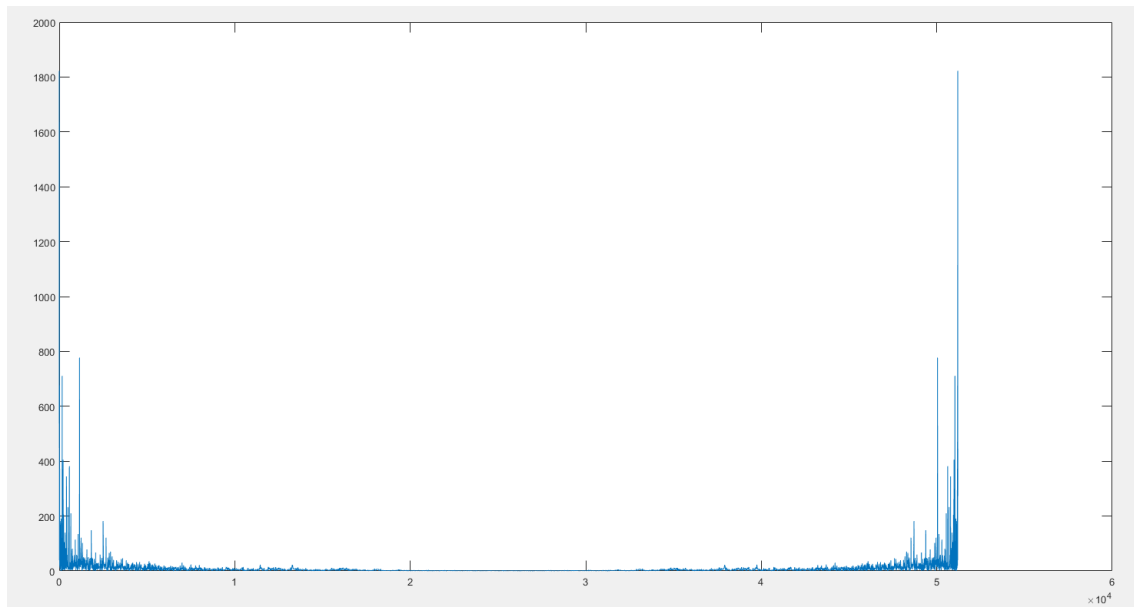
FRECUENCIA (Hz)										
Picos	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4	Canal 5	Canal 6	Canal 7	Canal 8	Canal 9	Canal 10
Nº1	1,95	1,95	0,78	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	1,95	192,97
Nº2	14,06	110,16	60,94	14,06	110,16	146,49	146,49	110,16	14,06	210,16
Nº3	46,88	146,49	146,49	45,70	146,49	192,97	192,97	146,49	146,49	248,05
Nº4	62,11	192,97	192,97	110,16	192,97	210,16	209,38	192,97	192,97	293,36
Nº5	192,97	210,16	208,60	146,49	208,60	293,36	439,85	209,38	209,77	439,85
Nº6	209,77	1026,57	222,27	210,55	586,72	586,72	586,72	293,36	440,24	586,33
Nº7	293,36	50173,82	248,05	293,36	880,08	880,08	733,21	1173,84	586,72	733,21
Nº8	439,85	50990,23	439,85	1026,96	1026,96	1026,57	880,08	50026,55	880,08	880,08
Nº9	586,33	51007,42	586,72	50173,43	50173,43	1173,84	1026,57	50907,03	1026,96	1026,96
Nº10	1026,96	51053,91	880,08	50907,03	50320,31	50026,55	1173,84	50991,01	1173,84	1173,84

Tabla 17

La celda 1x1 de la tabla amplitudes corresponde con la frecuencia de la celda 1x1 de la tabla de frecuencias. Observamos que las frecuencias están ordenadas de mayor a menor, ya que el código de Matlab nos lo exporta en orden que va encontrando los picos, haciendo un barrido de frecuencias.

Nos encontraremos casos, en que no tengamos 10 picos, es posible debido a los criterios que hemos establecido al principio. Puede darse el caso que existan más picos pero por debajo de los 200 Pa, entonces no los tenemos en cuenta.

Observamos que en la tabla de frecuencias nos encontramos con frecuencias del orden de 50.000 Hz. Esto es debido a que cuando hacemos una FFT con Matlab nos procesa lo siguiente:



Il·lustració 115

Este fenómeno sucede, porque la frecuencia de sampleo de nuestro equipo es de 50.000 Hz, es decir, adquiere 50.000 muestras por segundo. Para evitar visualizar la FFT así debemos imponer unas restricciones de límites, en la que el eje “x” (frecuencia) vaya desde 0 hasta $f_s/2$. De esta manera no veremos la simetría.

Una vez obtenidos los diez picos con sus respectivas amplitudes, veremos cuántos de esos picos corresponden a armónicos, es decir, cuántos de ellos dan como resultado un número entero si los dividimos entre su frecuencia fundamental. Eso es exactamente lo que haremos. En todas las tablas de frecuencias, dividiremos todos los valores entre su frecuencia fundamental y contra más números enteros dé como resultado, mejor será la calidad de la guitarra.

Posteriormente haremos un análisis visual para valorar cualitativamente el aspecto de cada gráfica FFT. Con las coordenadas de los picos, tenemos información de los puntos máximos, pero no sabemos qué sucede entre esos picos, pues cuanto más tienda a cero la amplitud de las frecuencias que se encuentran entre los armónicos, mejor será la calidad sonora. Idealmente, una gráfica que mostrara un sonido neto y de calidad debería ser cero en todo su espectro salvo en los armónicos. Contra más amplitud tengamos entre armónicos, peor calidad de sonido.

El procedimiento para mostrar los resultados será comparar la misma cuerda para las tres guitarras, mostrando las tablas con los armónicos y las gráficas FFT. Sólo mostraremos una gráfica FFT para cada cuerda de cada guitarra, con el objetivo de abreviar, ya que en total tenemos 180 gráficas (10 canales x 3 guitarras x 6 cuerdas). Como hemos comentado anteriormente, solo estudiaremos una de las cinco muestras, la que sea más representativa.

La presentación de los resultados, será una tabla con 10 columnas (una por canal) y dos subcolumnas dentro de cada canal, mostrando la frecuencia y el nº de armónico. Debajo de

cada columna mostraremos el porcentaje que hay de armónicos en los 10 picos, es decir, la fracción entre nº armónicos (numero entero) entre nº de picos. Descartaremos todos aquellos picos que correspondan a frecuencias del orden de 50.000 Hz, ya que no son motivo de estudio. La manera de clasificar los resultados será promediando todos los porcentajes de cada canal. Contra mayor sea el porcentaje promediado, en teoría, mayor será la calidad sonora de la guitarra.

6ª Cuerda -> Mi (Frecuencia Fundamental = 82,5 Hz)

Guitarra Admira

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm
0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	244,5	3,0
14,5	0,2	163,7	2,0	32,4	0,4	14,5	0,2	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	262,1	3,2
163,7	2,0	218,0	2,6	163,7	2,0	32,0	0,4	410,2	5,0	244,9	3,0	218,0	2,6	244,5	3,0	244,5	3,0	326,6	4,0
218,0	2,6	244,5	3,0	244,5	3,0	163,7	2,0	573,8	7,0	262,1	3,2	244,5	3,0	262,1	3,2	410,2	5,0	410,2	5,0
262,1	3,2	410,2	5,0	260,9	3,2	244,5	3,0	985,9	12,0	410,2	5,0	262,1	3,2	410,2	5,0	903,5	11,0	573,8	7,0
326,6	4,0	50790,2	616,4	326,6	4,0	410,2	5,0	1068,8	13,0	573,8	7,0	326,6	4,0	50790,2	616,4	985,9	12,0	588,3	7,1
410,2	5,0	50955,9	618,4	410,2	5,0	441,0	5,4	50131,6	608,4	50626,6	614,4	410,2	5,0	50938,3	618,2	50214,4	609,4	903,5	11,0
573,8	7,0	50982,4	618,7	50790,2	616,4	573,8	7,0	50214,4	609,4	50790,2	616,4	441,0	5,4	50955,9	618,4	50296,9	610,4	50296,9	610,4
50626,6	614,4	51036,7	619,4	50873,8	617,4	50626,6	614,4	50626,6	614,4	50938,3	618,2	492,6	6,0	51036,7	619,4	50790,2	616,4	50612,1	614,2
50790,2	616,4	51199,6	621,4	50939,5	618,2	50759,4	616,0	50790,2	616,4	50955,5	618,4	573,8	7,0	51199,6	621,4	50955,9	618,4	50626,6	614,4
57,14%		75%		66,67%		57,14%		100%		80%		66,67%		75%		100%		71,43%	

Tabla 18

PROMEDIO=76,88%

Guitarra Vicente Tatay Tomás

C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm
1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	225,8	2,7
107,0	1,3	194,9	2,4	35,2	0,4	106,6	1,3	249,2	3,0	164,8	2,0	107,0	1,3	31,6	0,4	249,2	3,0
164,8	2,0	225,8	2,7	107,0	1,3	194,9	2,4	295,7	3,6	194,9	2,4	164,8	2,0	330,1	4,0	296,1	3,6
248,8	3,0	247,3	3,0	247,3	3,0	249,2	3,0	330,1	4,0	225,8	2,7	194,9	2,4	494,9	6,0	330,1	4,0
296,1	3,6	330,1	4,0	494,9	6,0	494,9	6,0	494,9	6,0	249,2	3,0	225,8	2,7	660,2	8,0	412,5	5,0
330,1	4,0	660,2	8,0	50705,5	614,6	577,3	7,0	660,2	8,0	295,7	3,6	247,3	3,0	743,0	9,0	495,3	6,0
494,9	6,0	50540,2	612,6	51005,5	618,2	660,2	8,0	1155,9	14,0	330,1	4,0	660,2	8,0	908,6	11,0	577,3	7,0
660,2	8,0	50904,3	617,0	51093,4	619,3	743,0	9,0	1489,5	18,0	412,5	5,0	50540,2	612,6	1489,5	18,0	1573,4	19,0
50540,2	612,6	50953,1	617,6	51165,2	620,2	908,6	11,0	1573,4	19,0	495,3	6,0	50953,1	617,6	1739,5	21,0	1739,5	21,0
50705,5	614,6	50974,6	617,9	51199,2	620,6	50291,8	609,6	49626,9	601,5	577,3	7,0	50974,6	617,9	2412,1	29,0	49460,9	599,5
71,00%		60,00%		50,00%		75,00%		87,50%		66,67%		60,00%		88,89%		88,89%	

Tabla 19

PROMEDIO=71,99%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm
1,2	0,0	1,2	0,0	0,4	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	163,7	2,0
163,7	2,0	104,7	1,3	104,7	1,3	104,7	1,3	104,7	1,3	192,6	2,3	104,7	1,3	104,7	1,3	110,2	1,3	192,6	2,3
192,6	2,3	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	248,0	3,0	163,7	2,0	163,7	2,0	163,7	2,0	248,0	3,0
248,0	3,0	248,0	3,0	192,6	2,3	248,0	3,0	192,6	2,3	329,7	4,0	192,6	2,3	193,0	2,3	192,6	2,3	329,7	4,0
329,7	4,0	410,6	5,0	248,0	3,0	329,7	4,0	410,6	5,0	410,6	5,0	248,0	3,0	248,0	3,0	248,0	3,0	492,2	6,0
410,6	5,0	492,2	6,0	410,6	5,0	410,6	5,0	492,2	6,0	492,2	6,0	410,6	5,0	410,6	5,0	410,6	5,0	574,6	7,0
492,2	6,0	739,1	9,0	821,5	10,0	492,6	6,0	574,6	7,0	574,6	7,0	492,2	6,0	492,2	6,0	492,2	6,0	739,1	9,0
739,1	9,0	821,5	10,0	50378,9	610,7	739,1	9,0	821,5	10,0	739,1	9,0	739,1	9,0	50708,2	614,6	574,6	7,0	821,5	10,0
821,1	10,0	50378,9	610,7	50789,8	615,6	821,5	10,0	985,9	12,0	821,5	10,0	821,5	10,0	50789,8	615,6	739,1	9,0	903,5	11,0
903,5	11,0	50461,3	611,7	50952,3	617,6	903,5	11,0	50214,4	608,7	903,5	11,0	903,5	11,0	50952,3	617,6	821,1	10,0	985,9	12,0
88,89%		85,71%		66,67%		88,89%		75,00%		88,89%		77,78%		66,67%		77,78%		90,00%	

Tabla 20

PROMEDIO=80,63%

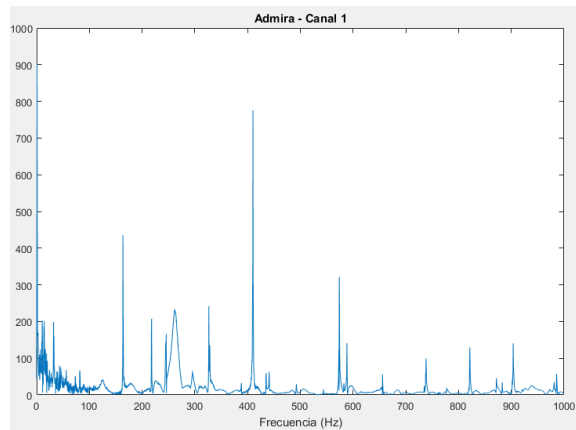


Ilustración 116

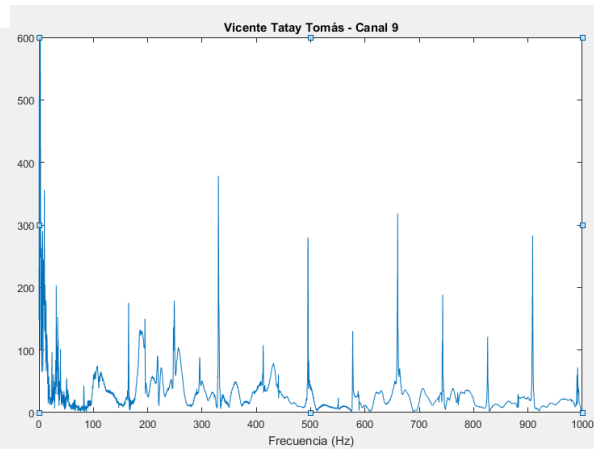


Ilustración 117

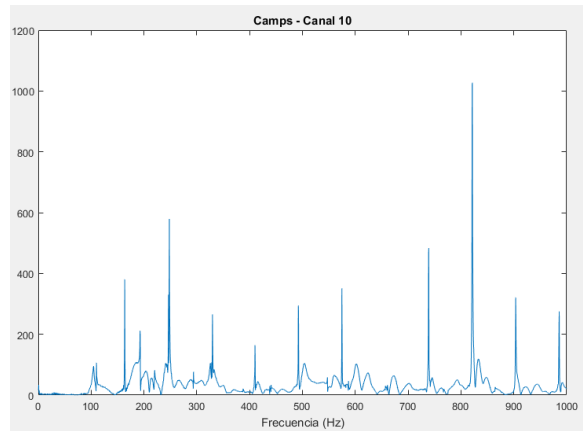


Ilustración 118

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:

Vicente Tatay Tomas (71,99%) < Admira (76,88%) < Camps (80,63%)

Observando las gráficas, vemos que la guitarra Camps, concentra mucho el sonido en los armónicos, mientras que sobretodo la Vicente Tatay tiene mucho ruido principalmente entre los 160 y 320 Hz, lo que hace que se ensucie mucho el sonido. La Admira no tiene tanto ruido entre armónicos, pero tiene bastantes picos fuera de armónicos, hecho que hace que el sonido se vea afectado. Si nos fijamos, en ninguno de los tres casos encontramos un pico en la frecuencia fundamental (82,5 Hz) y los armónicos que más se repiten son el 2º y el 3º.

5ª Cuerda -> La (Frecuencia Fundamental=110Hz)

Guitarra Admira

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
1,2	0,0	1,2	0,0	0,4	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	216,4	2,0
45,3	0,4	107,8	1,0	37,5	0,3	37,1	0,3	324,6	3,0	216,4	2,0	124,6	1,1	244,1	2,2	216,4	2,0	244,1	2,2
216,4	2,0	125,0	1,1	124,6	1,1	124,6	1,1	548,3	5,0	261,3	2,4	216,4	2,0	261,3	2,4	261,3	2,4	261,3	2,4
261,3	2,4	216,4	2,0	216,4	2,0	244,1	2,2	973,1	8,8	324,6	3,0	244,1	2,2	324,6	3,0	324,6	3,0	324,6	3,0
324,6	3,0	244,1	2,2	244,1	2,2	324,6	3,0	50227,3	456,6	548,3	5,0	261,3	2,4	50875,8	462,5	50875,8	462,5	548,3	5,0
50875,8	462,5	324,6	3,0	260,5	2,4	438,3	4,0	50659,8	460,5	50659,8	460,5	324,6	3,0	50939,1	463,1	50939,1	463,1	973,1	8,8
50939,1	463,1	50875,8	462,5	324,6	3,0	50768,4	461,5	50875,8	462,5	50875,8	462,5	438,3	4,0	50956,2	463,2	50984,0	463,5	50227,3	456,6
50984,0	463,5	50956,2	463,2	50875,8	462,5	50875,8	462,5	51199,2	465,4	50939,1	463,1	973,1	8,8	51199,2	465,4	51199,2	465,4	50659,8	460,5
51155,1	465,0	50984,0	463,5	50939,8	463,1	50956,2	463,2			50984,0	463,5	50227,3	456,6					50875,8	462,5
51199,2	465,4	51075,4	464,3	50956,2	463,2	51075,8	464,3			51199,2	465,4	50768,4	461,5					50939,1	463,1
50,00%		60,00%		33,33%		40,00%		66,67%		75,00%		42,86%		33,33%		66,67%		50,00%	

Tabla 21

PROMEDIO=51,79%

Guitarra Vicente Tatay Tomas

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
2,3	0,0	0,4	0,0	2,7	0,0	0,4	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	0,4	0,0	2,3	0,0	110,2	1,0
218,8	2,0	109,8	1,0	34,0	0,3	109,8	1,0	109,8	1,0	110,2	1,0	109,8	1,0	109,8	1,0	109,8	1,0	218,8	2,0
248,0	2,3	218,8	2,0	62,9	0,6	218,8	2,0	218,8	2,0	218,8	2,0	218,8	2,0	164,5	1,5	218,8	2,0	248,0	2,3
329,7	3,0	248,0	2,3	109,8	1,0	248,0	2,3	329,7	3,0	248,0	2,3	248,0	2,3	248,0	2,3	248,0	2,3	329,7	3,0
878,9	8,0	329,7	3,0	134,0	1,2	329,7	3,0	548,8	5,0	329,7	3,0	329,7	3,0	329,7	3,0	439,5	4,0	548,8	5,0
988,7	9,0	878,9	8,0	146,5	1,3	439,5	4,0	988,7	9,0	548,8	5,0	439,5	4,0	548,8	5,0	878,9	8,0	878,9	8,0
50211,7	456,5	50321,5	457,5	224,3	2,0	878,9	8,0	1098,8	10,0	988,7	9,0	548,8	5,0	50651,6	460,5	988,7	9,0	988,3	9,0
50321,5	457,5	50870,7	462,5	248,0	2,3	988,7	9,0	50101,6	455,5	50211,7	456,5	878,9	8,0	50870,7	462,5	1540,2	14,0	50212,1	456,5
50870,7	462,5	50952,3	463,2	548,8	5,0	50211,7	456,5	50211,7	456,5	50651,6	460,5	50321,5	457,5	50952,3	463,2	49660,1	451,5	50321,5	457,5
50952,3	463,2	50981,6	463,5	878,9	8,0	50321,5	457,5	50651,6	460,5	50870,7	462,5	50651,6	460,5	51035,9	464,0	50211,7	456,5	50651,6	460,5
80,00%		80,00%		44,44%		85,71%		100,00%		83,33%		85,71%		60,00%		85,71%		85,71%	

Tabla 22

PROMEDIO=79,06%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm	Frec	Arm
3,5	0,0	3,5	0,0	0,8	0,0	0,3	0,0	0,4	0,0	3,5	0,0	109,8	1,0	3,5	0,0	0,4	0,0	110,2	1,0
31,6	0,3	110,2	1,0	109,8	1,0	109,8	1,0	110,2	1,0	219,9	2,0	146,5	1,3	110,2	1,0	31,6	0,3	219,9	2,0
219,9	2,0	146,5	1,3	133,6	1,2	219,9	2,0	328,1	3,0	328,5	3,0	192,6	1,8	146,5	1,3	110,2	1,0	437,9	4,0
328,5	3,0	219,9	2,0	146,5	1,3	238,7	2,2	547,3	5,0	437,9	4,0	219,9	2,0	193,0	1,8	437,9	4,0	547,3	5,0
437,9	4,0	239,5	2,2	219,9	2,0	328,5	3,0	985,9	9,0	547,3	5,0	328,5	3,0	210,2	1,9	547,3	5,0	766,4	7,0
547,3	5,0	328,5	3,0	437,9	4,0	437,9	4,0	50214,4	456,5	657,0	6,0	437,9	4,0	328,5	3,0	657,0	6,0	793,8	7,2
766,4	7,0	437,9	4,0	876,2	8,0	985,6	9,0	50653,1	460,5	876,2	8,0	766,4	7,0	547,3	5,0	766,4	7,0	876,2	8,0
876,2	8,0	876,2	8,0	985,9	9,0	50214,8	456,5	50872,3	462,5	985,9	9,0	876,2	8,0	876,2	8,0	876,2	8,0	1544,3	14,0
50324,2	457,5	985,2	9,0	50214,4	456,5	50762,5	461,5	51090,2	464,5	50214,4	456,5	985,9	9,0	50324,2	457,5	985,9	9,0	49667,2	451,5
50434,0	458,5	50215,2	456,5	50324,2	457,5	50871,9	462,5	51196,9	465,4	50324,2	457,5	1314,9	12,0	50653,1	460,5	50214,4	456,5	50324,2	457,5
85,71%		75,00%		62,50%		83,33%		100,00%		100,00%		80,00%		71,43%		87,50%		87,50%	

Tabla 23

PORCENTAJE = 83.30%

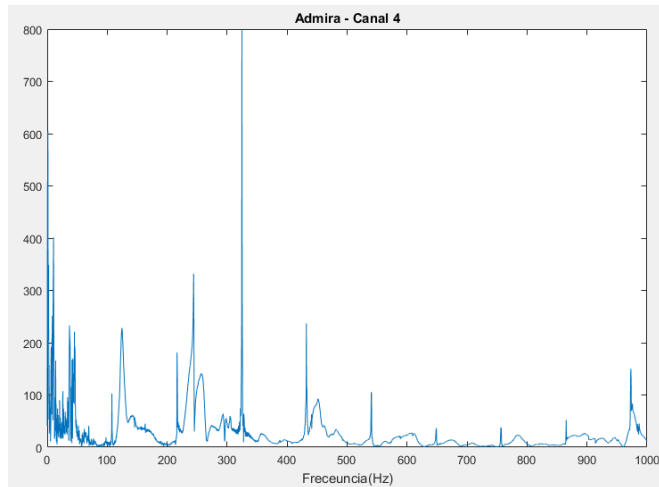


Ilustración 119

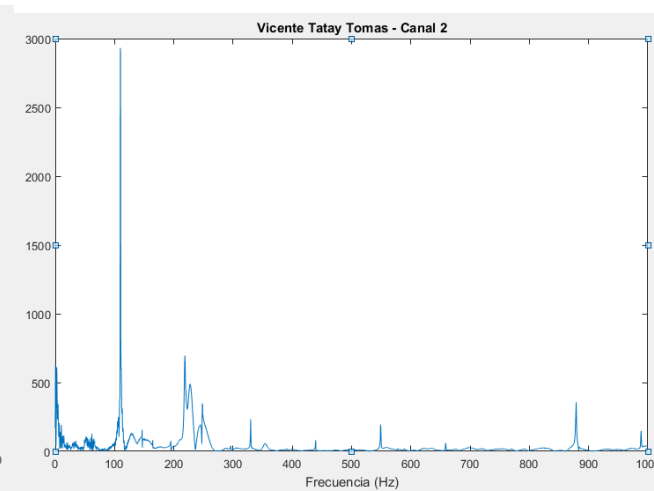


Ilustración 120

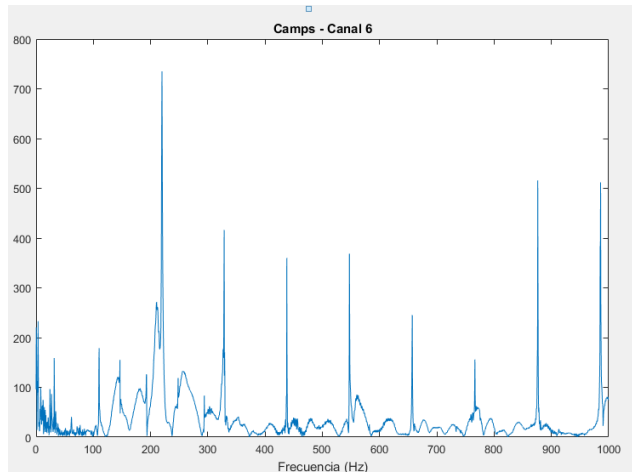


Ilustración 121

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:
Admira (51,79%) < Vicente Tatay Tomás (79,06%) < Camps (83,30%)

Si nos fijamos en las representaciones FFT, la Vicente Tatay Tomás es la que vemos más limpia (debemos tener en cuenta que el eje y tiene otra escala), y el armónico con más amplitud corresponde a la frecuencia fundamental, y por contrapartida los armónicos siguientes son muy débiles, no llegan a 500. En cambio en la Admira y la Camps encontramos más ruido entre armónicos, sobre todo entre 0 y 100 Hz, pero la diferencia es que la Camps tiene más acentuados los armónicos, aunque tenga algo de ruido entre ellos. El punto en común de las tres gráficas es que encontramos un pico de ruido entorno a los 200 Hz, acompañando al segundo armónico.

4º Cuerda -> Re (Frecuencia fundamental=146.8Hz)

Guitarra Admirra

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	244,9	1,7
32,0	0,2	30,1	0,2	32,8	0,2	30,1	0,2	30,1	0,2	30,1	0,2	145,3	1,0	32,0	0,2	30,1	0,2	259,0	1,8
259,8	1,8	145,3	1,0	145,3	1,0	145,3	1,0	145,3	1,0	145,3	1,0	259,8	1,8	145,3	1,0	145,3	1,0	294,1	2,0
293,4	2,0	244,9	1,7	244,9	1,7	244,9	1,7	294,5	2,0	294,1	2,0	294,5	2,0	294,1	2,0	439,5	3,0	439,5	3,0
439,5	3,0	294,1	2,0	258,2	1,8	293,8	2,0	439,5	3,0	425,3	2,9	439,5	3,0	439,5	3,0	586,3	4,0	586,3	4,0
586,3	4,0	439,5	3,0	439,5	3,0	439,5	3,0	586,3	4,0	586,3	4,0	586,3	4,0	50760,9	345,8	50614,1	344,8	733,2	5,0
733,2	5,0	50760,9	345,8	50760,9	345,8	50760,9	345,8	50614,1	344,8	1026,2	7,0	733,2	5,0	50906,2	346,8	50760,9	345,8	1026,2	7,0
50467,2	343,8	50906,2	346,8	50942,2	347,0	50906,6	346,8	50760,9	345,8	50174,2	341,8	50467,2	343,8	51055,1	347,8	51055,1	347,8	50174,2	341,8
50614,1	344,8	50955,5	347,1	50955,5	347,1	50955,5	347,1	50905,9	346,8	50614,1	344,8	50614,1	344,8	51168,4	348,6	51170,3	348,6	50467,2	343,8
50760,9	345,8	51055,1	347,8	51055,1	347,8	51055,1	347,8	51055,1	347,8	50760,9	345,8	50760,9	345,8	51197,3	348,8	51197,3	348,8	50614,1	344,8
66,67%		60,00%		40,00%		60,00%		80,00%		66,67%		83,33%		75,00%		75,00%		71,43%	

Tabla 24

PROMEDIO=67,81%

Guitarra Vicente Tatay Tomas

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,8	0,0	1,2	0,0	2,3	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	1,2	0,0	0,8	0,0	224,6	1,5
217,6	1,5	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	295,3	2,0
588,3	4,0	209,8	1,4	226,6	1,5	225,0	1,5	194,5	1,3	217,2	1,5	194,5	1,3	164,5	1,1	295,3	2,0	441,0	3,0
735,6	5,0	225,0	1,5	441,4	3,0	295,3	2,0	217,2	1,5	295,3	2,0	208,6	1,4	194,5	1,3	441,0	3,0	588,3	4,0
1175,8	8,0	441,0	3,0	588,3	4,0	441,0	3,0	295,3	2,0	441,4	3,0	224,6	1,5	294,5	2,0	735,6	5,0	1175,8	8,0
50024,6	340,8	588,3	4,0	735,6	5,0	588,3	4,0	441,4	3,0	588,3	4,0	295,3	2,0	441,4	3,0	1175,8	8,0	1469,9	10,0
50464,8	343,8	735,6	5,0	50464,8	343,8	735,2	5,0	588,3	4,0	735,6	5,0	441,0	3,0	50759,0	345,8	50024,6	340,8	49730,5	338,8
50612,1	344,8	50464,8	343,8	50612,1	344,8	882,4	6,0	50612,1	344,8	1175,8	8,0	588,3	4,0	50905,9	346,8	50464,8	343,8	50024,6	340,8
50982,8	347,3	50612,1	344,8	50759,0	345,8	50318,0	342,8	50759,0	345,8	50024,6	340,8	735,6	5,0	51005,9	347,5	50759,4	345,8	50612,1	344,8
51199,6	348,8	50759,4	345,8	50973,8	347,2	50465,2	343,8	50905,1	346,8	50464,8	343,8	1175,4	8,0	51035,9	347,7	50905,1	346,8	50759,4	345,8
75,00%		66,67%		80,00%		85,71%		66,67%		85,71%		66,67%		60,00%		100,00%		83,33%	

Tabla 25

PROMEDIO=76,98%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	146,5	1,0
14,2	0,1	104,3	0,7	34,8	0,2	35,2	0,2	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	14,2	0,1	293,8	2,0
209,8	1,4	146,5	1,0	146,5	1,0	146,5	1,0	293,4	2,0	193,0	1,3	193,0	1,3	163,7	1,1	146,5	1,0	440,2	3,0
293,8	2,0	193,0	1,3	293,8	2,0	220,3	1,5	586,7	4,0	209,8	1,4	209,4	1,4	293,4	2,0	209,8	1,4	586,7	4,0
440,2	3,0	293,0	2,0	440,2	3,0	293,8	2,0	1027,0	7,0	293,4	2,0	293,4	2,0	586,7	4,0	293,4	2,0	733,2	5,0
1027,0	7,0	50990,2	347,3	50760,2	345,8	440,2	3,0	50173,4	341,8	440,2	3,0	440,2	3,0	1027,0	7,0	440,2	3,0	880,5	6,0
50173,4	341,8	51007,4	347,5	50906,6	346,8	50760,2	345,8	50613,7	344,8	586,7	4,0	586,7	4,0	1173,8	8,0	586,7	4,0	1027,4	7,0
50760,2	345,8	51053,9	347,8	51053,9	347,8	50906,6	346,8	50907,0	346,8	1027,0	7,0	733,2	5,0	50026,6	340,8	880,5	6,0	1468,0	10,0
50906,6	346,8	51096,1	348,1	51165,6	348,5	50980,1	347,3	51007,4	347,5	1173,8	8,0	880,5	6,0	50907,0	346,8	1027,0	7,0	49732,4	338,8
50990,6	347,3	51198,8	348,8	51198,8	348,8	51053,9	347,8	51198,8	348,8	50026,6	340,8	1027,0	7,0	50991,0	347,4	1174,2	8,0	50173,0	341,8
75,00%		50,00%		75,00%		60,00%		100,00%		75,00%		77,78%		83,33%		87,50%		100,00%	

Tabla 26

PROMEDIO=78,36%

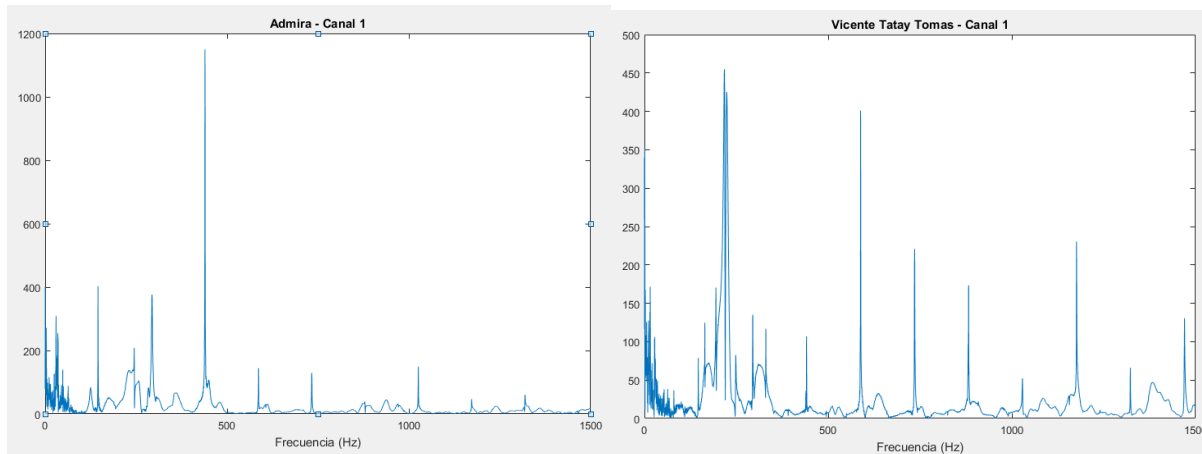


Ilustración 122

Ilustración 123

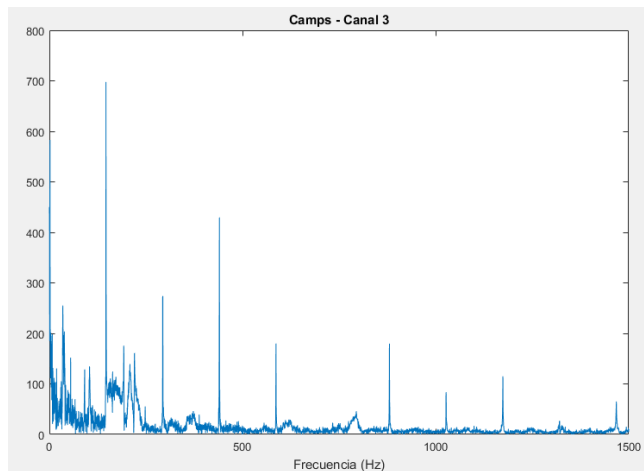


Ilustración 124

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:

Admira (67,81%) < Camps (70,06%) < Vicente Tatay Tomas (76,98%)

Si nos fijamos en las representaciones FFT, podemos observar que la Camps, a partir de los 250-300 Hz tiene muy poco ruido de fondo, prácticamente cero, mientras que la Admira y la Vicente Tatay Tomás tienen más ruido (entorno a los 50-100 Hz). Podemos destacar que en la Vicente Tatay Tomás, tenemos un cúmulo de picos entorno a los 220 Hz, que ensucia el sonido, a pesar de tener más porcentaje de armónicos. Observamos también que encontramos bastante ruido en las tres gráficas a frecuencias bajas, inferior a los 100 Hz. La representación que tiene más amplitud en la frecuencia fundamental es la Camps, que llega a tener casi 700 Pa a 146,8 Hz.

3º Cuerda -> Sol (Frecuencia fundamental = 196 Hz)

Guitarra Admira

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
1,2	0,0	1,2	0,0	0,8	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	1,2	0,0	260,2	1,3
14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	14,8	0,1	580,5	3,0
260,5	1,3	51185,5	261,2	259,0	1,3	580,5	3,0	193,0	1,0	260,5	1,3	193,4	1,0	193,4	1,0	386,7	2,0	969,5	4,9
386,7	2,0	51199,2	261,2	580,5	3,0	969,5	4,9	386,7	2,0	386,7	2,0	260,5	1,3	51007,0	260,2	50813,7	259,3	50230,9	256,3
580,5	3,0			50619,9	258,3	50230,9	256,3	580,5	3,0	580,5	3,0	386,7	2,0	51185,5	261,2	51185,5	261,2	50619,9	258,3
50619,9	258,3			50941,4	259,9	50619,9	258,3	969,1	4,9	50619,9	258,3	580,5	3,0	51199,2	261,2	51199,2	261,2	50940,2	259,9
50813,7	259,3			51185,5	261,2	51185,5	261,2	50231,2	256,3	50813,7	259,3	969,5	4,9						
50939,8	259,9			51199,6	261,2	51199,2	261,2	50619,9	258,3	50939,8	259,9	50230,9	256,3						
51185,5	261,2							50813,7	259,3	51185,5	261,2	50619,9	258,3						
51199,2	261,2									51007,4	260,2	51199,2	261,2	50813,7	259,3				
66,67%		NO EVALUABLE		50,00%		50,00%		75,00%		66,67%		60,00%		100,00%		100,00%		33,33%	

Tabla 27Tabla 28

PROMEDIO = 66,85%

Guitarra Vicente Tatay Tomas

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,4	0,0	0,4	0,0	1,2	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	194,9	1,0
194,9	1,0	194,9	1,0	194,9	1,0	226,2	1,2	194,9	1,0	194,9	1,0	194,9	1,0	194,9	1,0	194,9	1,0	225,8	1,2
225,0	1,1	226,2	1,2	226,2	1,2	248,8	1,3	218,0	1,1	218,0	1,1	226,2	1,2	390,6	2,0	248,8	1,3	248,8	1,3
248,8	1,3	248,8	1,3	248,8	1,3	390,6	2,0	390,6	2,0	390,6	2,0	248,8	1,3	977,0	5,0	390,6	2,0	390,6	2,0
390,6	2,0	585,9	3,0	390,6	2,0	585,9	3,0	585,9	3,0	585,9	3,0	390,6	2,0	50223,4	256,2	585,9	3,0	585,9	3,0
585,9	3,0	50614,4	258,2	585,9	3,0	977,0	5,0	977,4	5,0	977,0	5,0	585,9	3,0	50951,6	260,0	781,3	4,0	977,0	5,0
977,0	5,0	50951,6	260,0	977,4	5,0	50223,4	256,2	50223,0	256,2	50223,4	256,2	977,0	5,0	51005,5	260,2	50419,1	257,2	50223,4	256,2
50223,4	256,2	50974,2	260,1	50223,0	256,2	50614,4	258,2	50614,4	258,2	50614,4	258,2	1172,3	6,0	51199,2	261,2	50614,4	258,2	50614,4	258,2
50614,4	258,2	51005,5	260,2	50614,4	258,2	50809,8	259,2	50809,8	259,2	50951,6	260,0	1959,0	10,0			50809,8	259,2	50809,8	259,2
50809,8	259,2	51199,2	261,2	50809,8	259,2	50951,6	260,0	50982,4	260,1	50982,4	260,1	49241,4	251,2			50951,6	260,0	50951,6	260,0
66,67%		50,00%		66,67%		60,00%		80,00%		75,00%		75,00%		100,00%		80,00%		66,67%	

PORCENTAJE = 72,00%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,4	0,0	0,4	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,4	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	193,0	1,0
193,0	1,0	104,7	0,5	193,0	1,0	193,0	1,0	193,0	1,0	193,0	1,0	193,0	1,0	193,0	1,0	193,0	1,0	211,7	1,1
211,3	1,1	193,0	1,0	248,0	1,3	225,8	1,2	210,2	1,1	211,3	1,1	210,9	1,1	387,5	2,0	210,5	1,1	248,0	1,3
387,5	2,0	211,3	1,1	387,5	2,0	387,5	2,0	387,5	2,0	581,6	3,0	387,5	2,0	775,0	4,0	387,5	2,0	581,6	3,0
581,3	3,0	581,3	3,0	775,0	4,0	581,6	3,0	581,3	3,0	775,0	4,0	581,6	3,0	50425,4	257,3	581,3	3,0	775,0	4,0
775,0	4,0	978,4	5,0	50425,4	257,3	775,0	4,0	775,0	4,0	1372,4	7,0	775,0	4,0	50989,8	260,2	775,0	4,0	978,4	5,0
50425,4	257,3	50232,0	256,3	50812,9	259,2	50425,4	257,3	50425,4	257,3	49842,2	254,3	1173,3	6,0	51007,4	260,2	978,4	5,0	1372,4	7,0
50619,1	258,3	50977,0	260,1	50952,3	260,0	50618,7	258,3	50619,1	258,3	50425,4	257,3	50036,7	255,3	51199,6	261,2	1173,3	6,0	49842,2	254,3
50812,9	259,2	50989,1	260,1	51007,4	260,2	50812,9	259,2	50812,9	259,2	50618,7	258,3	50425,4	257,3			50036,3	255,3	50231,2	256,3
50989,1	260,1	51007,4	260,2	51199,6	261,2	50974,6	260,1	50990,2	260,2	50989,1	260,1	50618,7	258,3			50231,6	256,3	50425,4	257,3
80,00%		80,00%		75,00%		80,00%		80,00%		80,00%		83,33%		100,00%		85,71%		71,43%	

Tabla 29

PORCENTAJE = 81,55%

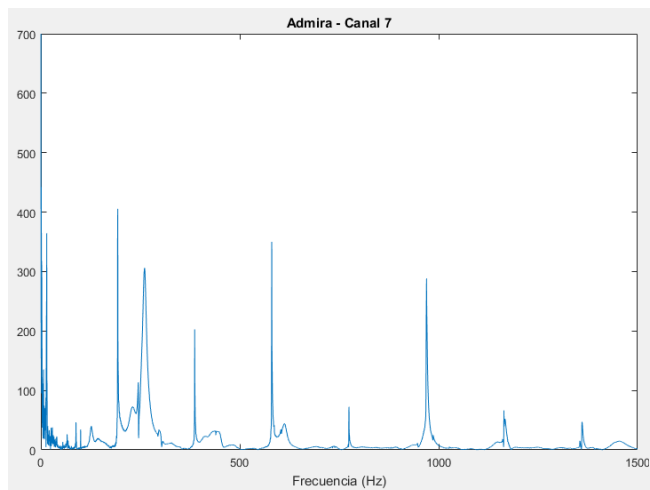


Ilustración 125

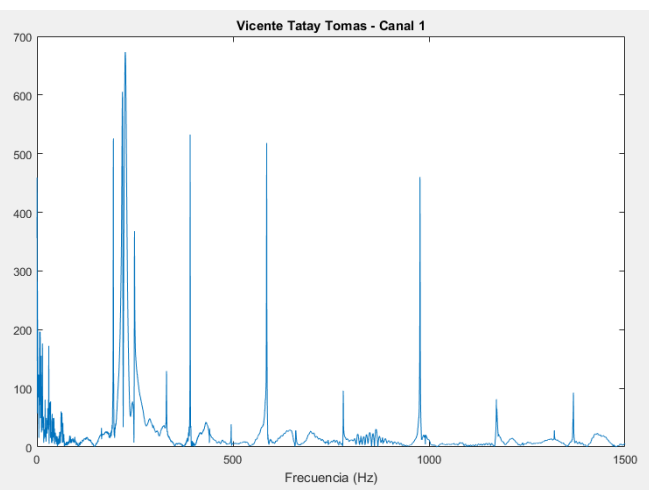


Ilustración 126

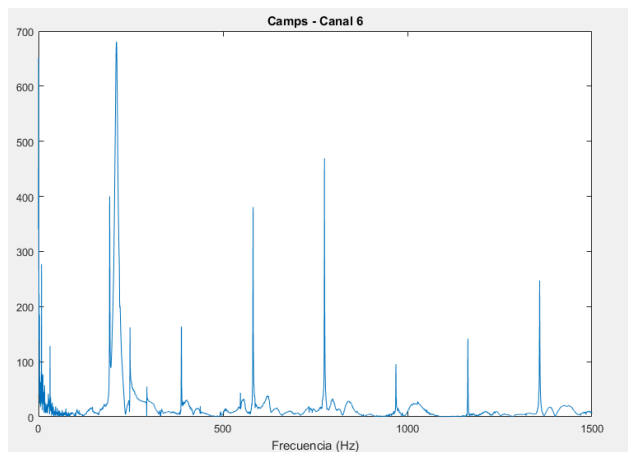


Ilustración 127

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:

Admira (66,85%) < Vicente Tatay Tomas (72,00%) < Camps (81,55%)

Observando las gráficas FFT, podemos ver que ninguna de las tres guitarras tiene excesivo ruido de fondo entre armónicos, aunque sí que tienen ruido a bajas frecuencias (debajo de 100 Hz). La que presenta más amplitud en la frecuencia fundamental es la Vicente Tatay Tomas, aunque está rodeada de picos bastante altos, por lo que son picos no deseados y ensucian el sonido. La guitarra Camps también tiene la frecuencia fundamental bastante alta, y a diferencia de la Vicente Tatay Tomas, no tiene tantos picos a su alrededor, y tiene los armónicos muy diferenciados. En cuanto a la guitarra Admira, tiene un aspecto bastante discreto, ya que los armónicos están diferenciados, pero encontramos picos entre armónicos. Seguramente, la que mejor aspecto tiene, es la Camps, y coincide con la valoración de porcentajes de armónicos.

2º Cuerda -> Si (Frecuencia fundamental = 246,9Hz)

Guitarra Admira

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	242,2	1,0
14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	259,0	1,0
242,2	1,0	67,6	0,3	242,2	1,0	242,2	1,0	69,1	0,3	69,1	0,3	242,2	1,0	67,6	0,3	69,1	0,3	486,7	2,0
486,7	2,0	242,2	1,0	265,2	1,1	486,7	2,0	242,2	1,0	242,6	1,0	260,2	1,1	242,2	1,0	242,2	1,0	729,7	3,0
50713,7	205,4	486,7	2,0	50942,2	206,3	973,8	3,9	50958,2	206,4	260,2	1,1	486,7	2,0	260,2	1,1	973,8	3,9	973,8	3,9
50940,2	206,3	50713,7	205,4	50958,2	206,4	50226,6	203,4	51131,2	207,1	50940,2	206,3	973,8	3,9	50940,2	206,3	50226,6	203,4	50226,6	203,4
51186,3	207,3	50958,2	206,4	51186,3	207,3	50713,7	205,4	51186,3	207,3	50957,8	206,4	50226,6	203,4	50958,2	206,4	50958,2	206,4	50470,7	204,4
51199,6	207,4	51132,8	207,1	51199,6	207,4	50958,2	206,4	51199,6	207,4	51131,2	207,1	50713,7	205,4	51132,8	207,1	51131,2	207,1	50713,7	205,4
		51186,3	207,3			51186,3	207,3			51186,3	207,3	50940,2	206,3	51186,3	207,3	51186,3	207,3	50941,4	206,3
		51199,6	207,4			51199,6	207,4			51199,6	207,4	50958,2	206,4	51199,6	207,4	51199,6	207,4	50958,2	206,4
100,00%		66,67%		50,00%		66,67%		50,00%		66,67%		50,00%		33,33%		33,33%		80,00%	

Tabla 30

PROMEDIO = 59,67%

Guitarra Vicente Tatay Tomas

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	248,4	1,0
14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	14,1	0,1	989,1	4,0
218,4	0,9	228,5	0,9	228,5	0,9	228,5	0,9	989,1	4,0	741,8	3,0	228,1	0,9	741,8	3,0	741,8	3,0	1484,0	6,0
741,8	3,0	50971,9	206,4	248,4	1,0	741,8	3,0	50211,3	203,4	989,1	4,0	248,4	1,0	989,1	4,0	945,0	3,8	49716,4	201,4
989,1	4,0	51186,3	207,3	741,8	3,0	989,1	4,0	51186,3	207,3	50211,3	203,4	725,3	2,9	50211,3	203,4	1484,0	6,0	50211,3	203,4
1484,0	6,0	51198,8	207,4	989,1	4,0	50211,3	203,4	51198,8	207,4	50458,6	204,4	989,1	4,0	50458,6	204,4	49716,4	201,4	50952,0	206,4
49716,4	201,4			50211,3	203,4	50458,6	204,4			51186,3	207,3	50211,3	203,4	51186,3	207,3	50211,3	203,4		
50211,3	203,4			50458,6	204,4	50971,9	206,4			51198,8	207,4	50458,6	204,4	51198,8	207,4	50458,6	204,4		
50458,6	204,4			50952,0	206,4	51186,3	207,3					50952,0	206,4			51186,3	207,3		
50982,0	206,5			50971,9	206,4	51198,8	207,4					50972,3	206,4			51198,8	207,4		
75,00%		0,00%		75,00%		66,67%		100,00%		100,00%		50,00%		100,00%		66,67%		100,00%	

Tabla 31

PROMEDIO = 73,33%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,8	0,0	0,8	0,0	1,6	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	0,8	0,0	247,7	1,0
25,0	0,1	25,0	0,1	25,0	0,1	25,0	0,1	39,8	0,2	247,7	1,0	192,6	0,8	25,0	0,1	247,7	1,0	740,6	3,0
247,7	1,0	103,9	0,4	39,8	0,2	39,8	0,2	987,9	4,0	740,6	3,0	209,8	0,8	247,7	1,0	740,6	3,0	987,9	4,0
740,6	3,0	209,8	0,8	247,7	1,0	247,7	1,0	50212,5	203,4	987,9	4,0	247,7	1,0	50952,7	206,4	987,9	4,0	50212,5	203,4
987,9	4,0	247,7	1,0	50952,7	206,4	740,6	3,0	51160,5	207,2	1977,4	8,0	740,6	3,0	51175,4	207,3	1977,4	8,0	50459,8	204,4
50212,5	203,4	740,6	3,0	51160,5	207,2	987,9	4,0	51199,6	207,4	49223,0	199,4	50459,8	204,4	51199,6	207,4	49223,0	199,4	50952,7	206,4
50459,8	204,4	50459,8	204,4	51175,4	207,3	50212,5	203,4			50212,5	203,4	50952,7	206,4			50212,5	203,4		
50952,7	206,4	50952,7	206,4	51198,8	207,4	50459,8	204,4			50459,8	204,4	50990,6	206,5			50459,8	204,4		
51175,4	207,3	50990,6	206,5			50952,7	206,4			50952,7	206,4	51007,8	206,6			50952,7	206,4		
51199,6	207,4	51096,5	207,0			51160,5	207,2			51199,6	207,4	51199,6	207,4			51199,6	207,4		
100,00%		50,00%		50,00%		75,00%		50,00%		100,00%		50,00%		100,00%		100,00%		100,00%	

Tabla 32

PROMEDIO = 77,50%

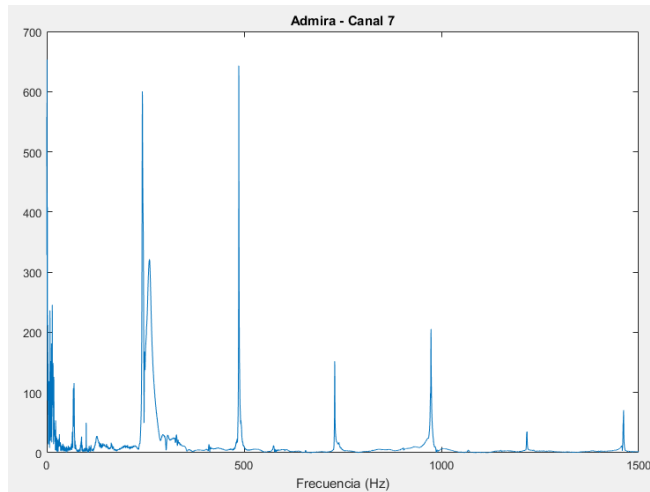


Ilustración 128

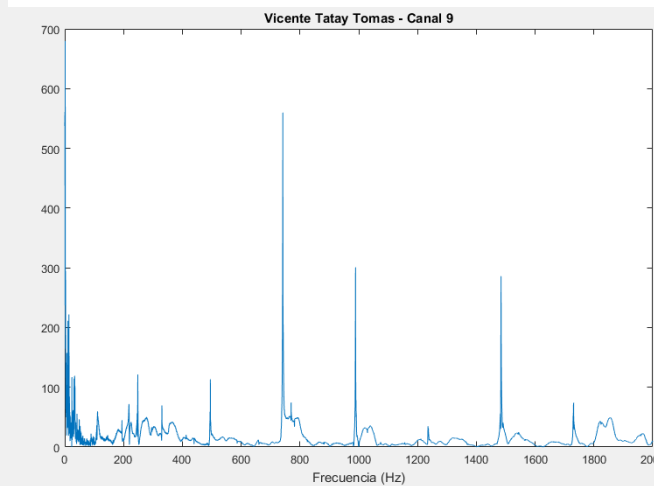


Ilustración 129

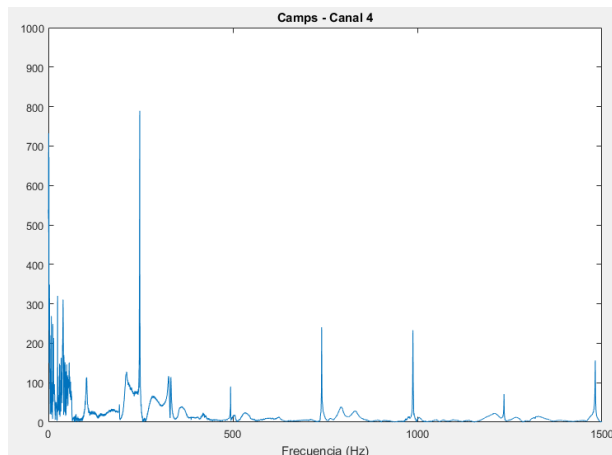


Ilustración 130

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:

Admira (59,67%) < Vicente Tatay Tomas (73,33%) < Camps (77,50%)

Observando las gráficas FFT, nos damos cuenta que la que produce más ruido de fondo es la Vicente Tatay Tomas, aunque no en exceso, ya que no supera los 100 Pa. La guitarra Camps es la que tiene mayor amplitud en la frecuencia fundamental, llegando a 800 Pa, mientras que la admira también se puede diferenciar claramente la frecuencia fundamental y en la Vicente Tatay no. Las que tienen mejor aspecto son la Admira y la Camps, por tener mucho más distinguidos los armónicos respecto otros picos correspondientes a frecuencias entre armónicos. Cabe destacar que las tres tienen picos de ruido por debajo de los 100 Hz, como hemos ido viendo anteriormente en las representaciones de las otras cuerdas.

1ª Cuerda -> Mi (Frecuencia fundamental = 329,6 Hz)

Guitarra Admira

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
0,4	0,0	0,4	0,0	3,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	1,3	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	0,4	0,0	283,4	0,9
36,9	0,1	13,7	0,0	17,2	0,1	35,6	0,1	38,6	0,1	38,6	0,1	78,0	0,2	13,7	0,0	36,9	0,1	328,0	1,0
283,9	0,9	38,6	0,1	35,2	0,1	48,9	0,1	656,5	2,0	283,4	0,9	283,4	0,9	38,6	0,1	328,0	1,0	656,5	2,0
327,6	1,0	327,6	1,0	48,9	0,1	328,0	1,0	1643,5	5,0	328,0	1,0	328,0	1,0	283,0	0,9	656,5	2,0	984,5	3,0
656,5	2,0	656,5	2,0	62,2	0,2	656,5	2,0	2301,7	7,0	656,5	2,0	656,5	2,0	328,0	1,0	984,5	3,0	1317,6	4,0
984,5	3,0	1643,5	5,0	283,0	0,9	1643,5	5,0	53899,3	163,5	984,5	3,0	1317,6	4,0	656,5	2,0	1643,5	5,0	1643,5	5,0
1317,6	4,0	1972,0	6,0	656,9	2,0	1972,0	6,0	54557,5	165,5	1317,6	4,0	1972,0	6,0	1643,5	5,0	1972,0	6,0	2961,6	9,0
1643,5	5,0	54229,0	164,5	55544,1	168,5	54229,0	164,5	55544,5	168,5	1643,1	5,0	54229,0	164,5	54557,5	165,5	3624,0	11,0	53239,4	161,5
3292,6	10,0	54557,5	165,5	55918,0	169,7	54557,5	165,5	56162,4	170,4	2961,6	9,0	54883,3	166,5	55544,5	168,5	52576,9	159,5	54557,5	165,5
52908,4	160,5	55544,5	168,5	56138,8	170,3	55544,5	168,5	56199,7	170,5	3293,0	10,0	55544,5	168,5	55872,9	169,5	54229,0	164,5	54883,3	166,5
85,71%		100,00%		33,33%		100,00%		100,00%		87,50%		66,67%		75,00%		100,00%		85,71%	

Tabla 33

PROMEDIO = 83,39%

Guitarra Vicente Tatay Tomas

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
1,6	0,0	1,6	0,0	0,4	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	0,8	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	330,5	1,0
13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	13,7	0,0	659,8	2,0
32,4	0,1	32,4	0,1	32,4	0,1	32,4	0,1	32,8	0,1	32,8	0,1	32,4	0,1	32,4	0,1	32,8	0,1	988,7	3,0
217,6	0,7	105,9	0,3	330,5	1,0	225,4	0,7	330,1	1,0	330,5	1,0	226,2	0,7	330,5	1,0	330,5	1,0	1318,8	4,0
330,5	1,0	226,2	0,7	660,2	2,0	330,5	1,0	660,6	2,0	659,8	2,0	330,5	1,0	355,9	1,1	659,8	2,0	1648,8	5,0
659,8	2,0	330,5	1,0	1318,8	4,0	660,2	2,0	988,3	3,0	988,7	3,0	660,2	2,0	660,2	2,0	1319,2	4,0	1978,1	6,0
988,3	3,0	353,9	1,1	1648,8	5,0	988,7	3,0	1318,4	4,0	1319,2	4,0	988,3	3,0	1318,8	4,0	1649,2	5,0	2308,2	7,0
1319,2	4,0	660,2	2,0	49551,5	150,3	1318,8	4,0	1648,8	5,0	1648,8	5,0	1318,8	4,0	49881,6	151,3	1977,7	6,0	2638,7	8,0
1648,8	5,0	1318,8	4,0	49881,6	151,3	1648,8	5,0	2638,7	8,0	1978,1	6,0	1648,8	5,0	50540,2	153,3	2638,7	8,0	4293,8	13,0
2639,1	8,0	1648,8	5,0	50540,2	153,3	2308,2	7,0	48561,7	147,3	2308,2	7,0	1978,1	6,0	50844,5	154,3	48561,7	147,3	4617,6	14,0
86%		71%		100%		86%		100%		100%		86%		75%		100%		100%	

Tabla 34

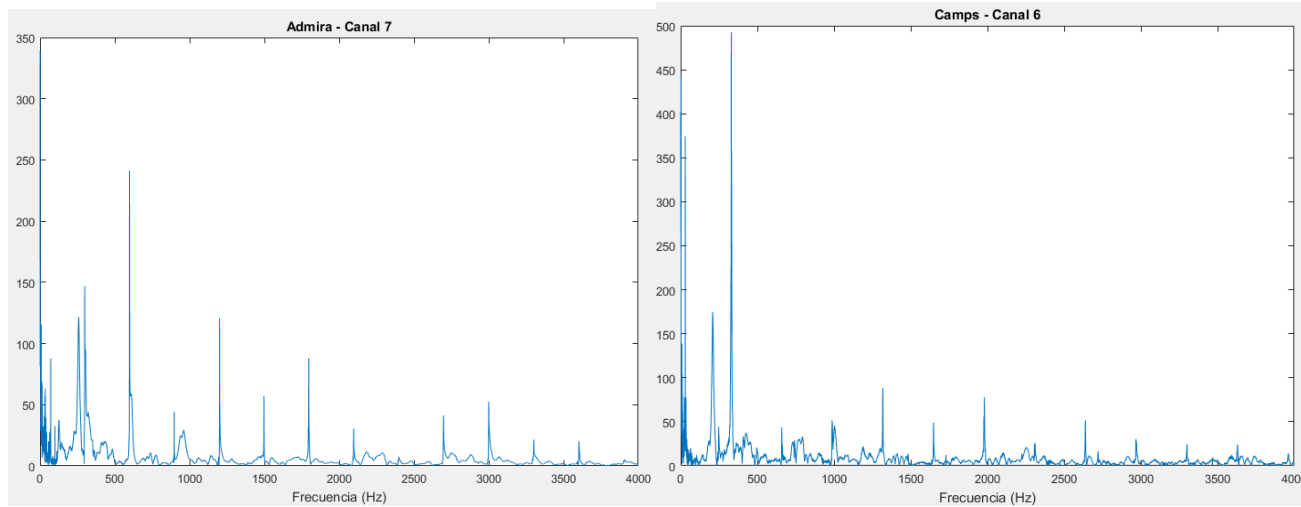
PROMEDIO = 90,36%

Guitarra Camps

C1		C2		C3		C4		C5		C6		C7		C8		C9		C10	
2,3	0,0	2,3	0,0	1,6	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0	2,3	0,0
20,7	0,1	32,8	0,1	22,3	0,1	20,7	0,1	33,6	0,1	208,2	0,6	20,7	0,1	32,8	0,1	30,1	0,1	328,9	1,0
33,2	0,1	33,2	0,1	42,2	0,1	43,4	0,1	48,0	0,1	331,6	1,0	225,0	0,7	331,6	1,0	330,1	1,0	659,4	2,0
329,3	1,0	208,2	0,6	103,9	0,3	329,3	1,0	103,9	0,3	659,4	2,0	330,1	1,0	988,7	3,0	659,4	2,0	988,3	3,0
659,4	2,0	330,1	1,0	328,9	1,0	659,4	2,0	207,8	0,6	988,7	3,0	416,4	1,3	1317,6	4,0	2306,3	7,0	1317,6	4,0
988,7	3,0	988,7	3,0	659,4	2,0	988,7	3,0	331,6	1,0	1317,6	4,0	659,4	2,0	2306,3	7,0	659,4	2,0	2306,7	7,0
1317,6	4,0	1317,6	4,0	1317,6	4,0	1317,6	4,0	659,4	2,0	1977,7	6,0	1317,6	4,0	50211,7	152,3	1317,6	4,0	2638,3	8,0
2307,4	7,0	1977,7	6,0	1977,7	6,0	1977,7	6,0	988,3	3,0	2638,3	8,0	1648,8	5,0	50868,7	154,3	2637,9	8,0	48562,1	147,3
2637,9	8,0	50211,7	152,3	49882,8	151,3	2638,3	8,0	1317,6	4,0	48562,1	147,3	2306,3	7,0	50992,6	154,7	5618,4	17,0	48893,7	148,3
48562,5	147,3	50846,5	154,3	50541,0	153,3	5618,4	17,0	2307,4	7,0	49222,6	149,3	48894,1	148,3	51096,9	155,0	45582,0	138,3	49882,8	151,3
100,00%		80,00%		80,00%		100,00%		71,43%		85,71%		85,71%		100,00%		100,00%		100,00%	

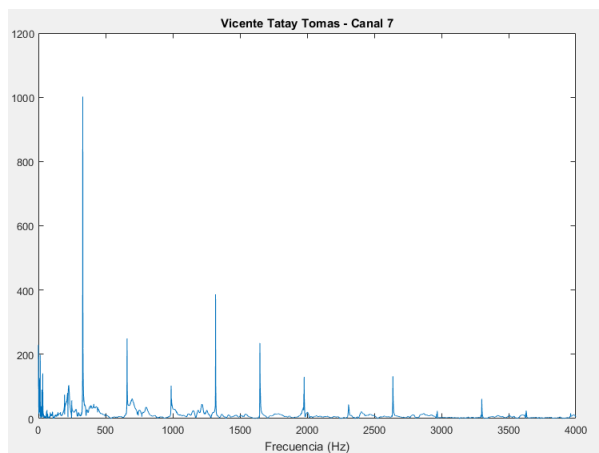
Tabla 35

PROMEDIO = 90,28%



Il·lustració 131

Il·lustració 132



Il·lustració 133

Observamos que por porcentaje de armónicos la valoración sería:

Admira (83,39%) < Camps (90,28%) < Vicente Tatay Tomas (90,36%)

Esta última cuerda la hemos tratado diferente a las demás. En el código Matlab hemos modificado la amplitud de los picos a exportar, ya que si nos fijamos la gran mayoría de los picos no llegan a 200 Hz. Esto es debido a que a mayores frecuencias, las amplitudes decrecen proporcionalmente. Es por ello que en las tablas vemos muchos valores en rojo, es decir que no tenemos en cuenta, ya sea por tener la frecuencia muy alta o muy baja, ya que el orden en el que selecciona los picos hace que exporte picos indeseados. Aun así observamos que tenemos FFT bastante limpias, con ruido de fondo muy bajo y con la frecuencia fundamental muy destacada en la Vicente Tatay Tomas y en la Camps.

Conclusiones del ensayo

Una vez finalizado el procesado de resultados del ensayo, podemos afirmar que existe una relación entre la calidad sonora de la guitarra y la concentración de frecuencias en los armónicos.

Hemos podido observar que la guitarra Camps es la que mayor porcentaje de picos en los armónicos tiene, mientras que la guitarra Admira la que menos, como esperábamos. Además hemos visto también que a medida que nos acercamos a frecuencias más altas, es más difícil encontrar picos de alta amplitud, por lo que la restricción que habíamos impuesto en el código Matlab de encontrar picos por encima de 200 Pa la hemos tenido que modificar en la última cuerda, ya que apenas llegábamos a los 200.

A continuación mostramos un cuadro resumen en el que vemos para cada guitarra y cuerda, que muestra hemos usado para analizarla, el canal de la gráfica FFT mostrado, el porcentaje para cada cuerda de cada guitarra y el promedio del porcentaje para cada guitarra:

	ADMIRA				VICENTE TATAY TOMAS				CAMPS			
	Nº Muestra	Canal	% Armónicos	Frec Fund	Nº Muestra	Canal	% Armónicos	Frec Fund	Nº Muestra	Canal	% Armónicos	Frec Fund
EL	3	1	76,88%	82,4 Hz	3	9	71,99%	82,4 Hz	1	10	80,63%	82,4 Hz
A	3	4	51,79%	110 Hz	1	2	79,06%	110 Hz	2	6	83,30%	110 Hz
D	1	4	67,81%	146,8 Hz	3	1	76,98%	146,8 Hz	5	3	78,36%	146,8 Hz
G	4	7	66,85%	196 Hz	3	1	72%	196 Hz	1	6	81,55%	196 Hz
B	2	7	59,67%	246,9 Hz	1	9	73,33%	246,9 Hz	1	4	77,50%	246,9 Hz
EH	3	7	83,39%	329,6 Hz	4	7	90,36%	329,6 Hz	4	6	90,28%	329,6 Hz
% PROMEDIO	-	-	67,73%	-	-	-	77,29%	-	-	-	81,94%	-

Tabla 36

En el cuadro vemos como los porcentajes promedios muestran claramente la clasificación real de la calidad de cada guitarra:

ADMIRA (67,79%) < *VICENTE TATAY TOMAS* (77,29%) < *CAMPS* (81,94%)

También hemos graficado la evolución de los porcentajes de armónicos en los picos en función de la cuerda de la guitarra. Observamos que el porcentaje no está relacionado con la frecuencia y que salvo en algún punto en el que se cruzan las líneas, cada guitarra está a un nivel, siguiendo el orden que acabamos de exponer.

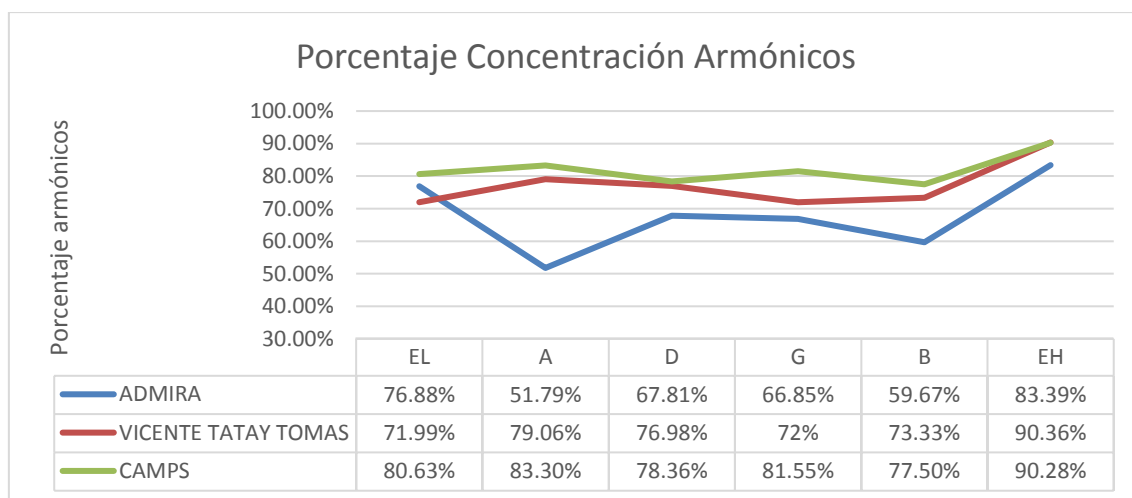


Ilustración 134

En cuanto a la valoración de las gráficas FFT de cada canal, no es una valoración representativa, ya que en la misma muestra y distintos canales podemos encontrar aspectos muy distintos, pues debemos tener en cuenta que cada micrófono está situado en un punto del espacio, y algunos muy lejanos entre ellos, por lo que la suma de ondas sinusoidales que le llegan a cada micrófono será siempre distinta entre sí, y como consecuencia los armónicos.

Debemos destacar también, que en las muestras de la 6ª cuerda encontramos muchas veces el cuarto armónico (dos octavas más agudo) con mucha amplitud. El cuarto armónico de la sexta cuerda corresponde a la frecuencia fundamental de la 1ª, ya que el Mi agudo (primera cuerda) son justo dos octavas más agudo que el Mi grave (sexta cuerda). Esto sucede debido a un fenómeno llamado cuerdas simpatizantes. Este fenómeno consiste en que cuando estimulamos cierta cuerda de una guitarra (con su frecuencia fundamental) y existe otra cuerda que en ese momento si la estimulamos producirá un sonido de una frecuencia múltiplo de 2, 4 u 8 (la misma nota en octavas más agudas o graves), esta segunda cuerda vibrará simpatizándose con la primera. Es decir, cuando tocamos un Mi grave, la primera cuerda (Mi

agudo) también vibrará suavemente. Este hecho sucede también con otros armónicos pero con menor transcendencia.

También cabe destacar que el micrófono que tiene un comportamiento bastante distinto a los demás es el micrófono 10. Éste micrófono en ningún caso ha captado armónicos cerca de cero, y casi siempre encontramos armónicos en él (salvo alguna excepción). Puede deberse a que la posición de éste micrófono estaba situado prácticamente encima de la fuente emisora de sonido (la guitarra) a unos 2m de altura. Teniendo en cuenta que la guitarra estaba estirada horizontalmente y que la dirección de propagación de la onda más intensa es la perpendicular a la tapa armónica de la guitarra tiene sentido encontrar estos resultados.

Por último, una vez vistos los resultados, podemos afirmar que otro aspecto fundamental a la hora de valorar una guitarra mediante su representación FFT, es que los armónicos que deben tener mayor amplitud para que una guitarra sea de buena calidad, son el primero y el segundo. Si nos fijamos, tanto la Admira como la Vicente Tatay Tomas escasamente tienen amplitud en el primer armónico. La guitarra Camps no siempre tiene un pico acentuado, pero sí que suele tener más amplitud comparándola con las otras dos guitarras. Debemos recordar que el primer armónico corresponde con la frecuencia fundamental, que como su propio nombre indica es la que representa y caracteriza el sonido y tono.

Tiempo de decaimiento

El código Matlab, nos exporta en el mismo Excel que los resultados de ensayo anteriores, en otra página, los tiempos de decaimiento que calcula para cada muestra y micrófono. En total tenemos 50 valores de tiempo por cuerda y guitarra, en total 900 valores.

El procedimiento que usaremos para procesar estos valores es simple, promediaremos esos 50 valores de cada cuerda de cada guitarra excluyendo valores aberrantes e incoherencias, que por algún motivo de cálculo o de generación de la envolvente nos da valores sin sentido.

La tabla que nos exporta de Matlab tiene un aspecto similar al siguiente:

Muestra nº	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
1	0,47131	0,48244	0,55688	0,49912	0,74760	0,46064	0,39395	0,74621	0,46025	0,29396
2	0,71740	0,82498	1,27998	0,83367	0,42857	0,70254	0,30959	0,84480	0,77854	0,33422
3	0,40783	0,71248	0,43174	0,39051	0,68805	0,31039	0,33885	0,72207	0,33186	0,30207
4	0,35928	0,48266	0,63400	0,50361	0,48826	0,43301	0,38717	0,42672	0,37824	0,28902
5	0,78029	0,70502	1,03402	0,72367	0,75354	0,69094	0,76873	0,77969	0,75613	0,30852

Tabla 37

Los valores corresponden a valores de tiempo en segundos.

Una vez procesados los datos de todas las cuerdas de cada guitarra el resultado es el siguiente:

Guitarra	Cuerda	TimeDecay
TATAY	EL	0,582165625
	A	0,563039844
	D	0,620051172
	G	0,577457422
	B	0,537518066
	EH	0,691258594
CAMPS	EL	0,439540365
	A	0,529129297
	D	0,569700391
	G	0,565895313
	B	0,570878906
	EH	0,541651367
ADMIRA	EL	0,770643066
	A	0,509567871
	D	0,704989746
	G	0,68948026
	B	0,639832031
	EH	0,828042969

Tabla 38

Para visualizar mejor los resultados, los hemos graficado. Podemos ver las 3 curvas correspondientes a las tres guitarras y el tiempo de decaimiento en función de la cuerda:

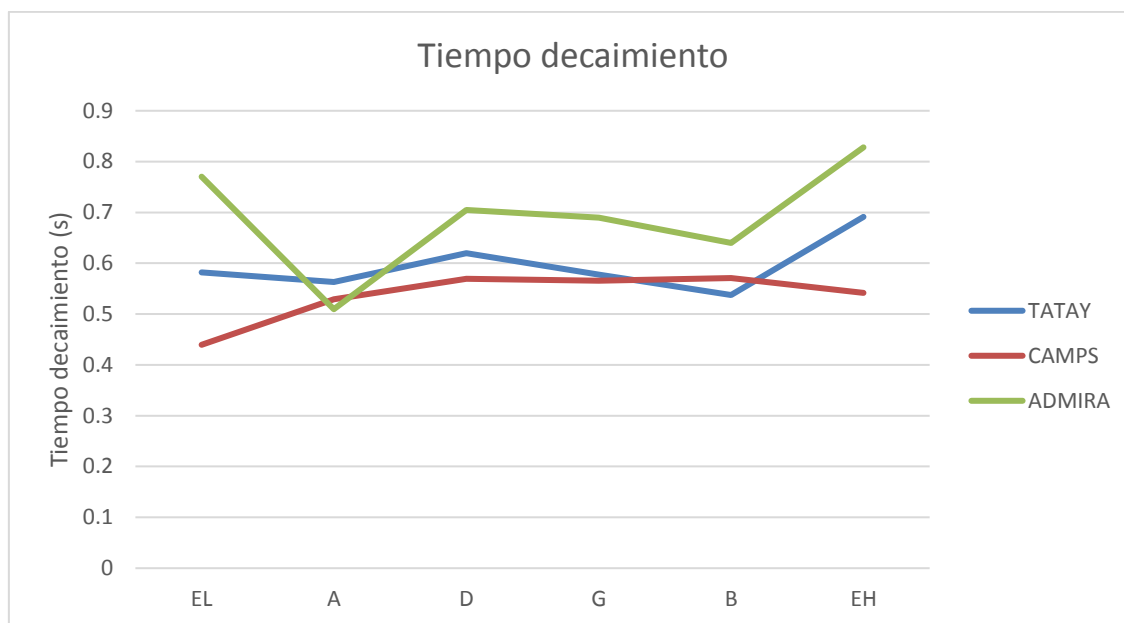


Ilustración 135

Observamos que el resultado obtenido no es lo que nos esperábamos. La guitarra que mayor tiempo de decaimiento tiene es la Admira, y la Camps y la Vicente Tatay Tomas tienen un comportamiento muy similar. Para valorar más genéricamente por guitarras, podemos promediar el tiempo de todas las cuerdas para cada guitarra. El resultado sería el siguiente:

Guitarra	Tiempo decaimiento promediado (s)
Camps	0,536133 s
Vicente Tatay Tomas	0,595248 s
Admira	0,690426 s

Tabla 39

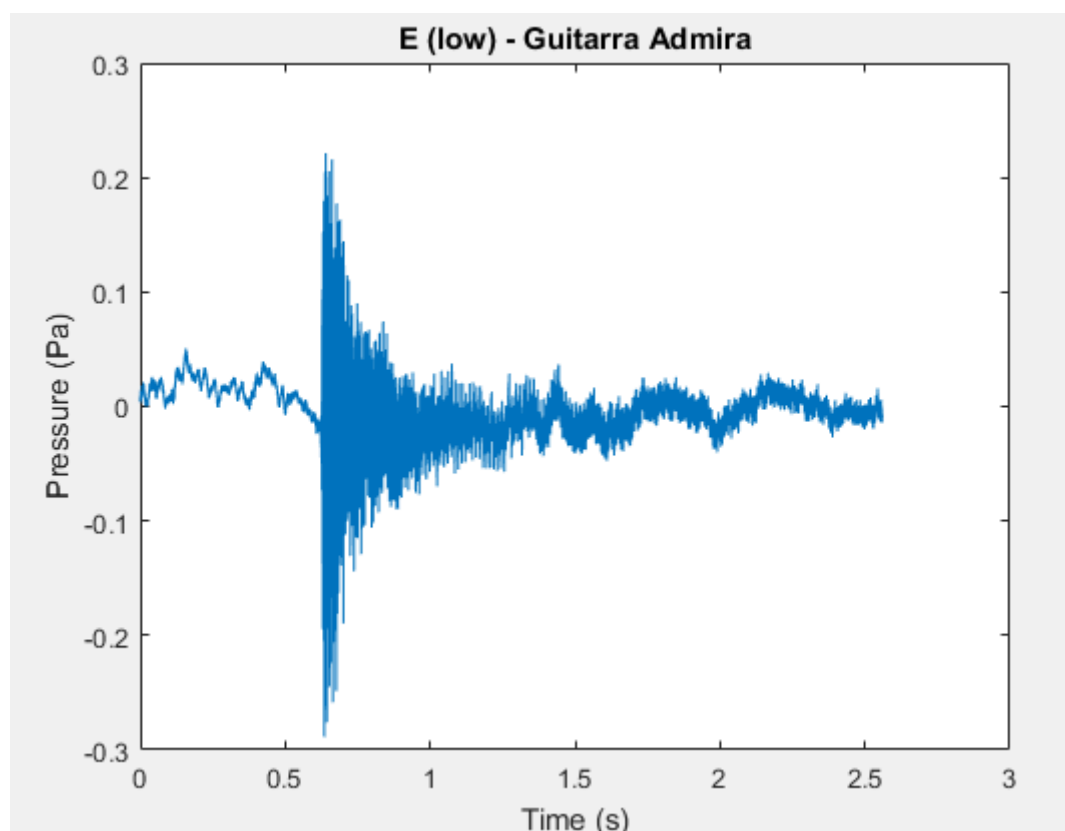
Vemos que el orden según el tiempo de decaimiento es:

$$CAMPS < VICENTE TATAY TOMAS < ADMIRA$$

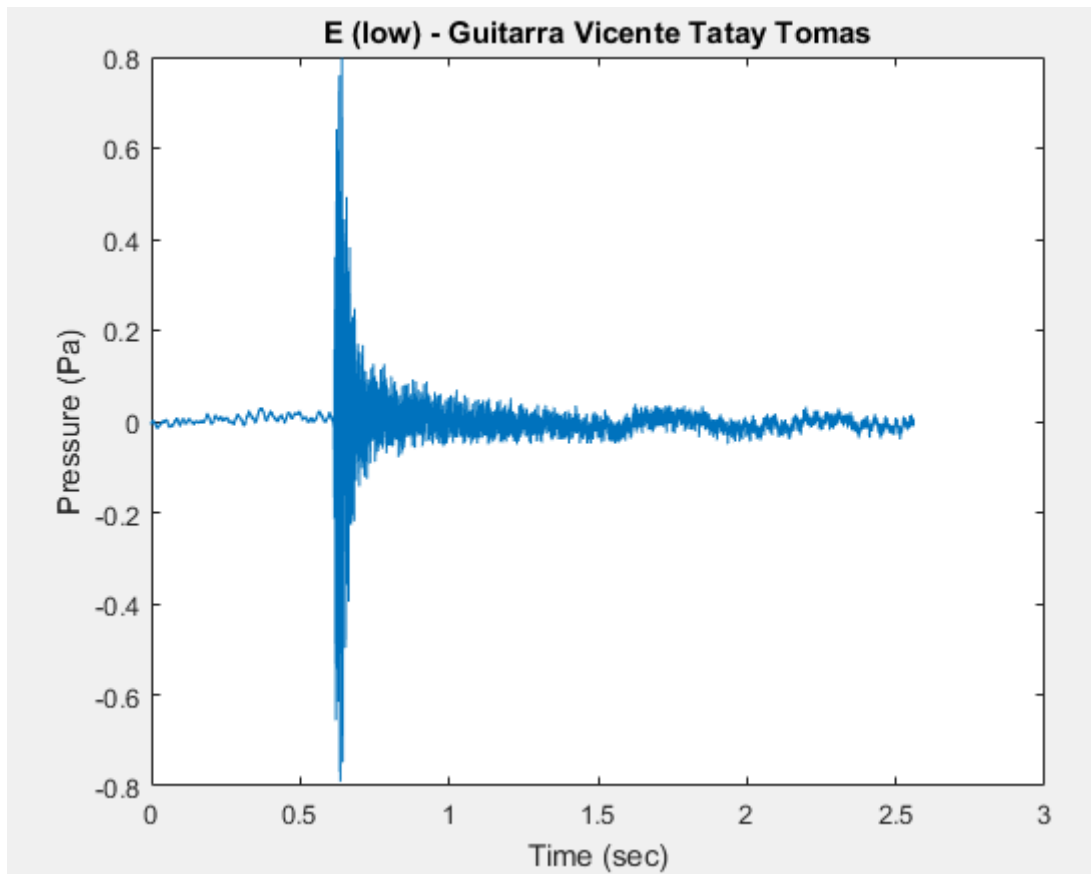
La única razón que he encontrado para justificar este resultado, es que el hecho de que la estimulación de la cuerda sea un golpe brusco (recordemos que la cuerda está sometida a una precarga de 20 N y la soltamos de golpe generando un impacto violento), yace que alcance un nivel puntual muy elevado, en comparación con el nivel al que suele sonar una guitarra) y este pico es tan pronunciado, que centésimas de segundo después la amplitud ya decrece de golpe hasta llegar a los valores usuales, y como la guitarra Admira es de dimensiones más pequeñas (y como hemos visto los picos máximos son de menor amplitud), la relación entre el valor máximo y el valor eficaz (RMS) es mucho menor, hecho que conlleva que el tiempo que tarda hasta llegar a un valor “estable” sea mayor a las demás guitarras.

Si nos fijamos en la diferencia entre valores máximos y valores RMS de las señales (en el primer ensayo) nos damos cuenta que la diferencia es considerable para justificarlo de esta manera.

Comparando las envolventes siguientes, en las que mostramos la respuesta a la misma estimulación de las dos guitarras vemos como el aspecto es totalmente distinto:



Il·lustració 136



Il·lustració 137

En la Vicente Tatay Tomas encontramos casi una línea vertical y puntual a unos 0,65s y después de una fracción muy pequeña de tiempo ya se estabiliza alrededor de cero.

En cambio en la Admira vemos como el perfil es mucho más continuo y la proporción entre el pico máximo y el valor cuando se estabiliza es mucho menor.

Este hecho es suficiente para valorar que el ensayo lo deberíamos haber preparado de otra manera, pero por falta de tiempo y medios (cuando nos hemos dado cuenta ya no teníamos disponibilidad de la cámara semianecoica ni teníamos el montaje preparado) no hemos podido repetir el ensayo con las condiciones óptimas.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado el proyecto, podemos afirmar que hemos cumplido la gran mayoría de los objetivos propuestos en un inicio. La finalidad del proyecto era poder establecer unos criterios para valorar la calidad de una guitarra mediante su representación gráfica, ya sea mediante su envolvente o mediante la FFT, y otras propiedades características del sonido de una guitarra.

Para empezar, ha sido necesario desarrollar el marco teórico en el que nos encontramos ya que, al no tener conocimientos previos sobre acústica, se han explicado conceptos básicos e imprescindibles para comprender e interpretar los resultados finales y para abastecer el objetivo del trabajo.

Partiendo de que la finalidad del proyecto era poder distinguir distintas calidades de guitarra, necesitábamos comparar sus propiedades acústicas. Se ha podido disponer de tres guitarras, de niveles de calidad bastante distintos. Una de calidad muy baja (Admira), otra de calidad media (Vicente Tatay Tomas) y otra de calidad media-alta (Camps). Una vez escogidas las guitarras, se debía plantear qué tipo de ensayo se iba a realizar para poder ver los aspectos que se querían estudiar.

Los aspectos que se requerían estudiar eran la potencia acústica que genera cada guitarra, el tiempo de decaída y los armónicos. Con la potencia acústica, se podía evaluar la intensidad sonora que radia la guitarra, que es un aspecto fundamental, pues una guitarra de calidad debe generar una potencia acústica suficiente para ser escuchada con claridad a un cierto radio de distancia. Con el tiempo de decaída, magnitud que define la duración de la señal acústica emitida por la guitarra, se puede analizar un aspecto de la calidad sonora, ya que una guitarra cuyo sonido se apague rápidamente no podrá ser de buena calidad. Por último, respecto a los armónicos, se estudiaba el timbre de la guitarra, que viene definido por la cantidad, amplitud y posición de los armónicos que tiene.

Debía ser un ensayo en el que las condiciones de cada muestra fueran exactamente las mismas y además asegurar una repetitividad, por ello se decidió realizar cinco muestras de cada cuerda de cada guitarra, con ello asegurábamos la repetitividad, y si al procesar nos dábamos cuenta de que una muestra difería mucho de las demás, se podía descartar. Posteriormente, se decidió la metodología del ensayo. No se podía estimular manualmente la guitarra, ya que de esta manera no se aseguraba que todas las muestras fueran iguales, por lo que la primera opción a valorar fue usar un Shaker. Con un Shaker nos asegurábamos de que la señal de entrada que estimulaba la guitarra era siempre la misma, con la misma frecuencia y amplitud, pero cuando nos disponíamos a realizar el ensayo nos dimos cuenta de que el Shaker generaba mucho ruido, por lo que las medidas de sonido no serían correctas, ya que el sonido captado no sería solamente el de la guitarra, sino el de la guitarra y el Shaker. Además con el Shaker teníamos una señal de entrada continua, y necesitábamos una estimulación puntual para evaluar algunos parámetros como el tiempo de decaída. Así que finalmente se decidió por usar un dinamómetro.

Con el dinamómetro podíamos someter cada cuerda a cierta precarga y liberarla de golpe dejando así, vibrar la cuerda libremente hasta que su sonido se mermara. Se realizaron distintas pruebas para decidir la precarga y se acabó escogiendo unos 20N. 20 N es una fuerza mayor de la que un guitarrista genera al tocar la guitarra, pero con fuerzas menores nos encontrábamos con que la señal se atenuaba demasiado rápido.

Con este ensayo era posible analizar las tres propiedades que se requerían estudiar desde un principio así que una vez realizados los ensayos, se procedió a realizar un procesado. El procesado se hizo mediante un código Matlab, ya que es la herramienta más eficaz para procesar señales de tantos datos. Recordemos que nuestro analizador de sonido capta la señal con una frecuencia de muestreo de 50.000 Hz, es decir, 50.000 muestras por segundo. Teníamos 90 muestras de unos 7 segundos cada muestra, así que se requería de un código que nos automatizara el proceso. Esta parte fue la más laboriosa de todo el trabajo, ya que al no tener conocimientos previos sobre procesamiento de señal (y no ser un experto en Matlab), fue necesario invertir mucho tiempo, pero finalmente se pudo extraer toda la información necesaria para estudiar los aspectos a analizar.

Una vez obtenida la información, se debían comparar los resultados obtenidos por cada cuerda respecto las tres guitarras. En cuanto a la potencia acústica, se optó por escoger la muestra más representativa de las cinco, y seguir los pasos indicados por la norma UNE de *"Determinación de Potencia Acústica"*, hasta obtener un resultado en dB por cada cuerda, éstos confirmaron la teoría de que a mayor calidad de la guitarra, mayor potencia acústica genera.

Respecto a los armónicos, al no tener una norma que nos indique cómo evaluar la calidad de un sonido mediante sus frecuencias, se optó por cuantificar cuantos picos de la FFT coinciden con sus armónicos. A mayor porcentaje de picos posicionados en una frecuencia múltiple de la frecuencia fundamental, valoramos que mayor nítida es la señal, pues una señal con amplitudes altas entre armónicos es resultado de ruido. Una vez obtenidos los resultados, se pudo confirmar que en la gran mayoría de los casos se cumplía que la guitarra de más calidad, tenía mayor porcentaje de armónicos en los picos. Debemos tener en cuenta que el hecho de liberar la carga de golpe, genera un impacto que se transforma en ruido y lo podemos ver reflejado en la FFT mediante ruido en los primeros armónicos. Además, se llegó a la conclusión de que los armónicos más importantes para determinar la calidad del sonido son los dos primeros. Lo pudimos comprobar comparando las gráficas FFT de la Admira y de la Camps, y observamos que la Admira, en la mayoría de los casos, apenas se distinguía la frecuencia fundamental, mientras que en la Camps sí.

Finalmente, respecto al tiempo de decaída, fue la única propiedad que no se correspondía con los resultados esperados, pero se encontró una justificación. Recordemos que el tiempo de decaída es el tiempo que tarda una señal en pasar del 90% al 10% de su máxima amplitud. Si nos fijamos en los picos máximos de amplitud de cada guitarra, nos damos cuenta de que la guitarra Admira apenas llega a los 0,6 Pa, mientras que la Camps y la Vicente Tatay Tomas llegan hasta los 1,2 Pa. Este hecho, hace que al tener un pico mucho más acentuado respecto al resto de señal, el tiempo que tarde en llegar al 10% de su máxima amplitud será mucho menor que en el caso de la Admira.

Finalmente, podemos decir que se ha abastecido el alcance del proyecto, aunque una vez hecho, se podrían mejorar algunos aspectos y sobretodo ampliar y profundizar mucho más sobre el tema. Por ejemplo, podríamos modificar las condiciones de ensayo con el fin de evaluar otros aspectos de la calidad sonora de una guitarra o hacer múltiples comparaciones entre guitarras con distintas propiedades, como por ejemplo ver cómo varia su sonido si estrechamos la boca, si modificamos la forma de la tapa armónica, si variamos la anchura de la caja de resonancia...

Al fin y al cabo, la guitarra es un instrumento del que se debe disfrutar, y por mucho que intentemos estudiar y analizar su sonido, no podemos olvidar que es un arte, y lo principal para hacer sonar bien una guitarra, es que esté tocada por unas buenas manos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sachs C (2006) The History of Musical Instruments, Dover, New York
- [2] A. Robertson; D. Stevens (1972). *Historia general de la música*. Madrid: Ediciones Istmo.
- [3] <http://www.laguitarra-blog.com/wp-content/uploads/2012/01/historia-de-la-guitarra-.pdf>
- [4] Richard Chapman (2013), Enciclopedia de la Guitarra: Historia, géneros musicales, guitarristas
- [5] www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC2_035.pdf
- [6] T. A. Lazo (2011), Revista Digital, Apuntes de Arquitectura: Viturbio los 10 libros de la arquitectura
- [7] Acoustical Society of America Helmholtz-Rayleigh Interdisciplinary Silver Medal in Biomedical Acoustics, Physical Acoustics, and Acoustical Oceanography
- [8] <https://sites.google.com/site/lasondasyelsonido/home>
- [9] hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/souspe.html
- [10] J.M. Merino de la Fuente, Las Vibraciones de la Música
- [11] <http://circuloesceptico.com.ar/2015/04/la-440-hz-la-frecuencia-goebbels>
- [12] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/intens.html>
- [13] <http://ocw.uv.es/ciencias/fisica/clase16.pdf>
- [14] <http://acusticaysonido.com/?p=76#prettyPhoto>
- [15] <http://www.ehu.eus/acustica/bachillerato/casoes/casoes.html>
- [16] Fletcher N and Rossing TD (1998), The Physics of Musical Instruments, 2nd ed.
- [17] Fahy F (1985) Sound and Structural Vibration. Academic Press San Diego
- [18] Richard Mark French (2009), Engineering the Guitar, Theory and Practice. Purdue University
- [19] <http://www.ctearquitectura.es/soluciones-sostenibles/materiales/la-absorcion-del-sonido/>

- [20] <http://www.rockfon.es/prestaciones/ac%C3%Bstica/c%C3%B3mo+comparar+la+ac%C3%Bstica+de+los+techos/indicadores+de+absorci%C3%B3n+ac%C3%Bstica>
- [21] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/_ondas/ondas.html#acustica
- [22] <http://www.ingenieriaacusticafacil.com/mitos-ingenieria-acustica-iglesias/>
- [23] <http://cpms-acusticamusical.blogspot.com.es/2010/03/refraccion.html>
- [24] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/diffrac.html>
- [25] Rossing, Thomas "Physics of Guitars: An Introduction", Journal of Guitar Acoustics nº 4, 1981.
- [26] J. Villar Rodriguez, La Guitarra Española, Características y Construcción
- [27] <http://www.esomogyi.com/principles.html>
- [28] <http://www.laguitarra-blog.com/category/la-guitarra-clasica/acustica-y-afinacion/caja-y-tapa-armonica/>
- [29] <https://www.guitarraviva.com/ajuste-del-alma-guitarra-mastil/>
- [30] <http://www.miacorde.com/news/diapason-guitarra-clasica-famenca.html>
- [31] L. Fábregas Ibáñez, (2012), La Construcción de la Guitarra Española
- [32] <http://www.guitarbassluthier.com/guitarbassluthierblog/2013/10/28/la-importancia-del-calibre-de-cuerdas>
- [33] <https://books.google.es/books?id=HOZtuQYe5FIC&pg=PA35&lpg=PA35&dq=timbre+calidad+sonora&source=bl&ots=cyyjcTpYId&sig=ommUABK288m8ywoKJWkKgRWXjHk&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjEqovxhqNTAhWDVxoKHYbvC3kQ6AEIRTAf#v=onepage&q=timbre%20calidad%20sonora&f=false>
- [34] David HA (1988) The Method of Paired Comparisons. Oxford University Press

Material adicional

- Dries Standaert; Assignment Music and Mathematics Guitar Acoustics
- Erik V. Jansson (1983); Function. Construction and Quality of the Guitar
- Ricardo Ruiz Boullosa (1996), Algunas Notas Sobre la Acústica de la Guitarra Clásica, México D.F.
- G. Caldersmith (1978), Guitar as a reflex enclosure
- R. Bader (2005), Computational Mechanics of the Classical Guitar
- Esteban M. Gonzalez, Primera Aproximación a la Acústica de la Guitarra
- H. R. Piñero, Leyes y Reglas en el Uso y Manejo del Micrófono
- R. Arcos Villamarín, Apunts de Vibracions Mecàniques, LEAM, UPC.
- UNE-EN ISO 3744 Determinacio Potencia Per Pressio
- Ian Perry (2014), Thesis: Sound Radiation Measurements on Guitars and Other Stringed Musical Instruments
- Ramirez RW (1985), The FFT: Fundamentals and Concepts. Prentice Hall
- Bolwell JE (1999), How Realistic is the D'Alembert Plucked String?. European Journal of Physics
- Jaroszewski A and Rakowski JZ (1978) Opening Transients and the Quality of Classical Guitars